

Titre: Intégration de structures absorbantes acoustiques innovantes au sein d'une turbosoufflante
Title:

Auteur: Arnaud Dubourg
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Dubourg, A. (2015). Intégration de structures absorbantes acoustiques innovantes au sein d'une turbosoufflante [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2045/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2045/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Annie Ross
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INTÉGRATION DE STRUCTURES ABSORBANTES ACOUSTIQUES INNOVANTES AU
SEIN D'UNE TURBOSOUFFLANTE

ARNAUD DUBOURG

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

DÉCEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

INTÉGRATION DE STRUCTURES ABSORBANTES ACOUSTIQUES INNOVANTES AU
SEIN D'UNE TURBOSOUFFLANTE

présenté par : DUBOURG Arnaud

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. THERRIAULT Daniel, Ph. D., président

Mme ROSS Annie, Ph. D., membre et directrice de recherche

M. COLLIN Dominique, DEA, membre

DÉDICACE

“On voyage pour changer, non de lieu, mais d'idées.”

Hippolyte Taine

REMERCIEMENTS

Je voulais tout d'abord exprimer toute ma gratitude à ceux qui ont rendu ces deux dernières années de maîtrise trépidantes et chargées de souvenirs.

Tout d'abord je souhaitais remercier chaleureusement Annie Ross pour sa confiance, son soutien humain et scientifique qui m'ont permis de réaliser ces travaux passionnants. Un grand merci également à Édith Roland Fotsing pour sa disponibilité, son aide précieuse et sa créativité sans quoi mes après-midis n'aurait pas été les mêmes. Ma gratitude va également à Daniel Therriault pour m'avoir donné la chance d'utiliser ses équipements.

À Jacky Mardjono, pour le temps qu'il m'a consacré et ses conseils d'expert tout au long du projet, Georges Riou pour sa patience et les nombreux échanges très instructifs, Cédric Morel pour son accueil et son soutien durant mes six mois passés à Villaroche et Dominique Colin pour cette opportunité unique.

À mes collègues du LAVA : Elsa Piollet, Jean-Michel Attendu, Marion Cossin et Cédric Pupin avec qui j'ai partagé d'excellents moments ainsi que ceux du LM² et CCHP : Yahya, Rolland, Sampada et Qinghua qui m'ont accueilli chaleureusement et pour les discussions fructueuses échangées.

Merci aux collaborateurs du groupe SAFRAN, et particulièrement à Nicolas Vernet pour l'énergie qu'il a apportée à ce projet.

Je remercie sincèrement mes amis pour leur affection et les fous-rires inoubliables, Anthony, Clara, les aventuriers de Détroit, les Expats de Montréal, la Team C.C et les hockeyeurs qui rendent l'hiver plus chaleureux.

Merci de tout mon cœur à ma famille qui est toujours présente avec leurs encouragements et soutien sans faille.

RÉSUMÉ

Les bruits générés par les avions représentent aujourd'hui un défi acoustique important avec l'accroissement du trafic aérien mondial et des aéroports proches de zones urbanisées. Le son émis par les moteurs est prédominant et fait l'objet d'efforts importants d'optimisation pour limiter son impact sur les populations survolées. En particulier, la nouvelle génération de turbosoufflante à fort taux de dilution entraîne des exigences plus fortes en termes de performance des traitements acoustiques. Ce projet de maîtrise étudie les nouvelles opportunités ouvertes par les procédés de fabrication additive dans la création de structures acoustiques innovantes destinées à traiter les zones moteur pour accroître la réduction du bruit d'un turboréacteur.

Les requis fonctionnels d'un traitement acoustique pour une zone moteur spécifique ont tout d'abord été recueillis. Ils ont permis la sélection des procédés de fabrication additive les plus pertinents pour la création de plusieurs structures poreuses ordonnées tridimensionnelles. Ces microstructures possédant une forte capacité de dissipation de l'énergie acoustique ont été conçues et réalisées grâce à des procédés de micro-fabrication additive. Trois procédés distincts ont fait l'objet de travaux de développement; l'un d'entre eux parvient à fabriquer des échantillons acoustiques et mécaniques viables. Les modèles de prédiction du comportement acoustique ont été sélectionnés et adaptés pour prendre en compte les paramètres d'impression de la fabrication additive. Ils ont permis de mener une étude paramétrique quantifiant la performance d'atténuation acoustique réalisable par des réseaux filamentaires ordonnés (équivalents aux échantillons produits par fabrication additive). Enfin la capacité à prédire et optimiser des structures acoustique ordonnées issus de la fabrication additive a été vérifiée. Les outils de modélisation mis en place permettent également l'étude de revêtements acoustiques constitués de matériaux à réaction non localisée avec des propriétés différentes selon l'épaisseur.

Les principaux résultats sont énoncés. Un procédé de fabrication de structures acoustiques ordonnées par fabrication additive a été mis au point et permet une impression rapide et robuste d'échantillons. L'optimisation d'un procédé d'écriture directe par polymère thermodurcissable avec la création d'un nouveau matériau imprimable a permis la fabrication d'échantillon de caractérisation acoustique et mécanique avec des capacités de réalisation de structures poreuses supérieures à celles des machines commerciales actuelles. Les résultats montrent que l'impédance

et l'absorption d'une microstructure générée par la fabrication additive est prédictible avec 5% d'écart maximal. La fabrication additive est capable de reproduire des microstructures acoustiques contrôlées performantes car on observe une impédance identique pour des échantillons issus d'une même impression ou d'impressions distinctes. Des modèles acoustiques dédiés permettent de prédire fidèlement le comportement acoustique de traitements acoustiques possédant plusieurs microstructures associées et avec des épaisseurs variables. Des tests acoustiques en incidence normale au tube d'impédance montrent un potentiel d'absorption élevé et est en accord avec les prédictions théorique pour les structures additives réalisées (1 à 5% d'écart sur les indices d'absorption).

Des essais mécaniques de flexion et compression montrent qu'il est possible d'obtenir des propriétés mécaniques intéressantes tout en gardant une structure poreuse permettant l'absorption acoustique, avec une augmentation de poids de l'ordre de 30%.

La création d'une coopération entre trois laboratoires (LAVA : expertise acoustique, CCHP : expertise composite, LM2 : expertise fabrication additive) a permis l'élaboration d'une solution innovante.

Mots clés : Aéroacoustique, turboréacteurs, acoustique des moteurs, fabrication additive, intégration aéronautique, modèles acoustique de milieu poreux, méthode des matrices de transfert, acoustique de microstructures ordonnées, mécanique de structures composites, fabrication de microstructures par impression 3D, innovation.

ABSTRACT

Urban densification and worldwide increasing commercial air traffic lead to noise mitigation challenge for aircraft engines. Indeed, engines contribute to a great extent to the noise experienced by airports neighbouring communities, and are therefore subject to consistent efforts from engine manufacturers and researchers to reduce the perceived nuisance. This project aims at drawing new perspectives arising from the emergence of additive manufacturing technologies to create novel acoustics concepts to be integrated in modern turbo-engines.

Design constraints for acoustic liners were collected. Based on these, screening of additive manufacturing process was performed to select the best production methods for porous and ordered microstructures. These high acoustic energy dissipation, three-dimensional structures were created using different additive manufacturing process. Three processes were thoroughly studied and one led to viable samples for acoustic and mechanical testing. Specific models to predict the acoustic behavior of the samples have been adapted to include printing parameters for additive manufacturing. A parametric study was conducted to map absorption efficiency in terms of geometric parameters for sonic crystals. Finally, accuracy, fidelity and stability between predicted and measured acoustic properties have been checked. Numerical models were implemented to design new acoustic liners involving different non-locally reacting materials and distinct microstructures.

The research has resulted in a novel method to produce ordered acoustic structures using additive manufacturing. The development allows to produce robust samples using a faster procedure. Micro Direct Write Printing using thermoset polymers was optimized for a brand-new feeding material to produce acoustic and mechanical samples for proper characterization. Ordered porous structures created with this new method showed an enhanced capability versus commercially available machines products. The results show that the impedance and absorption from these microstructures can be predicted within 5% accuracy. Reproducibility for identical microstructures from the same printing or distinct printing is shown. Specific acoustic models allowed prediction of impedance and absorption from multilayer liners with different microstructures and thickness. Acoustic testing using normal incidence impedance tube showed high and predictable absorption level within 1 and 5% deviation between simulations and measured values.

Bending and compressive mechanical testing revealed interesting strength and modulus. Although 30% heavier than the honeycomb baseline, the additive manufactured porous structure allows substantial acoustic dissipation and promising mechanical property to withstand harsh environment conditions experienced during flight.

New cooperation between 3 key-laboratories in acoustics, composites and additive manufacturing led to innovative designs and solutions to tackle complex requirements involved in aircraft engines technology.

Keywords: Aeroacoustics, turboengines, engine acoustics, additive manufacturing, aeronautics integration, acoustic models for porous materials, transfer matrix method, acoustics of ordered microstructures, mechanical behavior of composite structures, 3D printing for microstructure generation, innovation.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XX
LISTE DES VARIABLES	XXII
LISTE DES ANNEXES.....	XXV
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
1.1 Acoustique des moteurs d'avion	3
1.1.1 Notions générales aéroacoustiques.....	3
1.1.2 Le bruit de soufflante	6
1.1.3 Traitements acoustiques actuels pour la réduction du bruit de soufflante	9
1.2 Traitements acoustiques à réaction non-localisée	11
1.3 Morphologie des matériaux poreux.....	15
1.4 Mécanismes de dissipation dans les mousses stochastiques pour l'acoustique	17
1.5 Cristaux soniques, microtreillis et mousse syntactiques	21
1.6 Fabrication additive pour production de matériau acoustique	22
1.7 Théorie de Biot et modèles pour poreux stochastiques.....	24
1.7.1 Hypothèses générales	25

1.7.2	Paramètres acoustiques	25
1.7.3	Théorie de Biot.....	27
1.7.4	Équation d'onde de la pression acoustique à l'intérieure d'un tube de section circulaire :.....	28
1.7.5	Complexification des modèles de propagation acoustique dans les milieux poreux au cours du temps.....	28
1.7.6	Modèle de Delany et Bazley :	29
1.7.7	Modèle de Miki :	30
1.7.8	Modèle de Johnson-Champoux-Allard (JCA):	30
1.7.9	Modèle de Johnson-Champoux-Allard-Lafarge (JCAL):	31
1.7.10	Modèle de Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge (JCAPL) :	31
1.8	Propagation acoustique au sein de structures microcanaux	32
1.8.1	Formulation du problème :	34
1.8.2	Résolution du problème	35
1.9	Modèle acoustique de propagation au sein de structures filamenteuses ordonnées (Modèle AML : <i>Additive Micro Lattice</i>)	38
CHAPITRE 2	OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE.....	42
CHAPITRE 3	SÉLECTION DE PROCÉDÉS DE FABRICATION ADDITIVE	44
3.1	Introduction à la fabrication additive	44
3.2	Processus de conception et avantages associés à l'emploi des technologies AM.....	45
3.3	Familles de Procédés AM	48
3.4	Technologies impliquées et procédés associés.....	49
3.5	Procédés utilisés pour un but acoustique.....	51
3.6	Équipements disponibles pertinents pour microfabrication de matériaux acoustiques..	52

3.6.1	Station de travail.....	52
3.6.2	Logiciels employés.....	53
3.6.3	Écriture directe par solidification avec évaporation de solvant	53
3.6.4	Écriture directe d'encre sacrificielle + imprégnation.....	54
3.6.5	Écriture directe de polymères thermodurcissables.....	55
3.7	Conclusion du chapitre :.....	55
CHAPITRE 4 MODÈLES ACOUSTIQUES ADAPTÉS POUR MICROSTRUCTURES PAR FABRICATION ADDITIVE.....		57
4.1	Réseau de microcanaux ordonnés	57
4.2	Optimisation des paramètres de microstructures filamenteuses pour absorption	60
4.2.1	Architecture poreuse considérée	60
4.2.2	Méthode d'analyse des performances des cristaux soniques	62
4.2.3	Absorption des cristaux soniques.....	64
4.3	Modèle de traitement multipropriétés (Modèle MML : <i>Multi Materials Liners</i>)	71
4.3.1	Théorie et formulation.....	71
4.3.2	Validation du code MML.....	76
4.3.3	Extraction de l'information : impédance matériau.....	77
4.3.4	Simulation de milieu poreux par modélisation de fluides équivalents.....	78
4.3.5	Multi fluides équivalents versus un fluide équivalent propagé	81
4.4	Conclusion du chapitre.....	83
CHAPITRE 5 FABRICATION, CARACTÉRISATION MÉCANIQUE ET ACOUSTIQUE DE MATÉRIAU ACOUSTIQUE PAR FABRICATION ADDITIVE		84
5.1	Matériaux acoustiques réalisés par fabrication additive	84
5.2	Comportement acoustique des échantillons générés par Écriture directe μ FDM	85

5.2.1	Prédiction AML versus résultats expérimentaux	86
5.2.2	Reproductibilité d'échantillons et influence de l'impression.....	92
5.2.3	Prédiction du comportement acoustique de multicouches	94
5.2.4	Synthèse des résultats acoustiques	97
5.3	Comportement mécanique.....	98
5.3.1	Définition de la composition des échantillons	98
5.3.2	Tests de compression	98
5.3.3	Tests de flexion 3 points.....	101
5.3.4	Analyse générale des tests réalisés.....	102
CHAPITRE 6	TRAVAUX FUTURS	103
CHAPITRE 7	CONCLUSION	105
BIBLIOGRAPHIE	108
ANNEXES	115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Propriétés générales de poreux en fonction du matériau constitutif de la phase solide (Banhart, 2006).....	13
Tableau 1-2 : Possibilité de production de mousses métalliques par la société RECEMAT	20
Tableau 1-3 : Équations de modèle JCAPL	32
Tableau 3-1 : Familles de procédés au sein de la fabrication additive.....	48
Tableau 3-2 : Opportunités et limites des procédés commerciaux.....	49
Tableau 3-3 : Matrice procédés / matériaux.....	50
Tableau 3-4 : Pertinence des familles de procédés de fabrication additive pour l'acoustique	51
Tableau 4-1 : Paramètres de Biot de la mousse de mélamine (Dupont et al., 2013)	71
Tableau 5-1 : Dimensions des échantillons de compression.....	98

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Pondération des composantes du bruit au décollage et à l'atterrissage d'un avion a) Contributions typiques au décollage et b) Contributions typiques à l'atterrissage (modèles avions à titre d'illustration) (IROQUA projet, 2006).....	4
Figure 1-2 : Signature fréquentielle classique des différents organes du moteur (Julliard, 2003)....	5
Figure 1-3 : Répartition des traitements acoustiques et sources aéroacoustiques (Roger, 2012)	5
Figure 1-4 : Directivité des différentes composantes du bruit moteur	6
Figure 1-5 : Spectre typique d'une soufflante en régime subsonique (Reboul, 2010)	7
Figure 1-6 : Différents phénomènes générant le bruit de soufflante (Ventres, Theobald, 1982).....	7
Figure 1-7 : Zones d'implantations de traitements acoustiques sur moteur (Bielak, Gallman, Kunze, & Murray, 2002)	8
Figure 1-8 : Exemple de diffusion d'onde dans un matériau a) à réaction localisée et b) à réaction non localisée (Malmay, 2000).....	9
Figure 1-9 : Traitements acoustiques actuels	10
Figure 1-10 : Spectre typique d'absorption des traitements SDOF et DDOF	11
Figure 1-11 : Spectre typique d'absorption d'une mousse acoustique.....	11
Figure 1-12 : Couplages des phases matières au sein d'un matériau poreux et opportunités associées	12
Figure 1-13 - Répartition des applications des matériaux poreux selon la microstructure	13
Figure 1-14: Classification par taille de pores demandée (Ishizaki, Komarneni, & Nanko, 2013)	14
Figure 1-15 : Image SEM de poudre de bronze frittée (Bodla, 2014).	15
Figure 1-16 : Microscopie de fibre de verre.....	16
Figure 1-17 : Microscopie optique d'une mousse cellulaire (mousse d'alliage nickel).....	16

Figure 1-18 : a) Structure stochastique (Bock, 2011) b) Structure périodique ordonnée (Schaedler et al., 2011).....	18
Figure 1-19 : Microscopie optique a) de fibre de verre et b) de laine de roche	18
Figure 1-20 : Mousses polyuréthane avec différents degrés de réticulation (Hoang, 2012).....	19
Figure 1-21 : a) Mousse de carbone, b) mousse métallique.....	19
Figure 1-22 : Mousses à porosité partiellement ouverte ou fermée utilisées en acoustique QUASH® (mousse de polyoléfine(Bolton, 2002)) (à gauche), SOLIMIDE® (mousse de polyimide) (à droite).....	20
Figure 1-23 : Mousse métallique ordonnée (Meisel, 2012)	21
Figure 1-24 : a) Tissage 3D de fils métalliques et b) microtreillis 3D d'aluminium (à droite).....	22
Figure 1-25 : Micro-absorbeurs quart-d'onde par fabrication additive (Setaki & Tenpierik, 2014)	23
Figure 1-26 : Structures microcanaux destinées aux études et à la calibration des bancs acoustiques de la NASA (Langley).....	24
Figure 1-27 : Complexification des modèles semi-phénoménologiques en fonction de la forme des pores (L. Jaouen et F.X. Bécot, http://apmr.matelys.com/)	29
Figure 1-28 : Modèles de propagation d'onde sonore dans tube étroit Atténuation Γ' et changement de phase Γ'' en fonction du nombre d'onde en cisaillement.....	33
Figure 1-29 - Coordonnées dans le tube.....	35
Figure 1-30 : Module polytropique	36
Figure 1-31 : Caractéristiques du fluide équivalent	37
Figure 1-32 : Impédance acoustique normalisée et absorption du traitement par microcanaux	38
Figure 1-33: Schéma descriptif d'un cristal sonore	39
Figure 3-1 : Processus de création d'objet par fabrication additive.....	46
Figure 3-2 : Station de microfabrication additive au laboratoire LM ²	53

Figure 3-3 : Illustration du procédé par l'évaporation de dichlorométhane (DCM) mélangé à l'acide polylactique (PLA) (Guo, Heuzey, & Therriault, 2014)	54
Figure 3-4 : Échantillon réalisé par imprégnation gravitaire d'un échafaudage de filaments de cire	55
Figure 4-1 - Architecture théorique	57
Figure 4-2: Module polytropique d'un traitement acoustique par microcanaux optimisé.....	58
Figure 4-3 : Impédance normalisée et absorption d'un traitement acoustique par microcanaux optimisé	59
Figure 4-4 : Structure de cristal sonique	60
Figure 4-5 : Évolution du paramètre de maille spécifique <i>aspec</i> en fonction de r_0 et wf	61
Figure 4-6 : Évolution de la longueur libre spécifique de passage <i>wspec</i> en fonction de r_0 et wf	62
Figure 4-7 : Gamme de fréquences considérées.....	63
Figure 4-8 : Indice d'absorption en basse fréquences.....	64
Figure 4-9 : Impédance optimale normalisée et absorption en incidence normale d'un cristal sonique en basses fréquences	65
Figure 4-10 : Indice d'absorption pour fréquences intermédiaires	66
Figure 4-11 : Impédance optimale normalisée et absorption en incidence normale d'un cristal sonique en fréquences intermédiaires	66
Figure 4-12 : Indice d'absorption hautes fréquences	67
Figure 4-13 : Impédance optimale normalisée et absorption en incidence normale d'un cristal sonique en hautes fréquences	68
Figure 4-14 : Indice d'absorption cristaux soniques orthogonaux droits [3,6; 289kr]	69
Figure 4-15 : Évolution logarithmique de la résistivité au passage de l'air en fonction des paramètres du cristal sonique.....	69

Figure 4-16 : Impédance optimale normalisée et absorption en incidence normale d'un cristal sonique de 40mm d'épaisseur pour $f \in [3,6;289\text{kr}]$	70
Figure 4-17 : Microscopie de mousse de mélamine (Basotect)	71
Figure 4-18 : Association de 5 milieux aux propriétés différentes dans un tube d'impédance. Les différents milieux et leurs épaisseurs respectives sont notées de 1 à 5.	73
Figure 4-19 : Propriétés de fluide équivalent déterminées par mesure de l'échantillon au tube d'impédance et paramètres de la microstructure	74
Figure 4-20 : Galette de mousse métallique, épaisseur 1/10 d' <i>espéc</i>	76
Figure 4-21 : Comparaison des valeurs expérimentales (EXP) versus impédance pure utilisée par le code MML – épaisseur spécifique de mousse 1/10.....	77
Figure 4-22 : Configuration expérimentale (EXP) versus configuration du modèle (MML)	78
Figure 4-23 : Comparaison EXP versus MML – 2/10 <i>espéc</i>	78
Figure 4-24 : Comparaison EXP versus MML – 3/10 <i>espéc</i>	79
Figure 4-25 : Comparaison EXP versus MML – 4/10 <i>espéc</i>	79
Figure 4-26 : Comparaison EXP versus MML - 5/10 <i>espéc</i>	80
Figure 4-27 : Comparaison EXP versus MML – 6/10 <i>espéc</i>	80
Figure 4-28 : Configurations MML multi_fluides équivalents ou propagation MML par un unique fluide équivalent (monofluide).....	81
Figure 4-29 : Résultats d'impédance et d'absorption en propagation multi-fluides et monofluides	82
Figure 5-1 : Illustration Structure OD	84
Figure 5-2 : Illustration du principe de densification du réseau réalisé par fabrication additive ...	85
Figure 5-3 : Échantillon mis en place dans le tube d'impédance.....	85
Figure 5-4 : Microstructure pour 2 paramètres de maille.....	86
Figure 5-5 : Impédance et absorption acoustique théoriques et mesurées de l'échantillon 10	87

Figure 5-6 : Indice de performance théorique (modèle AML), positionnement de l'échantillon 10	88
Figure 5-7 : Impédance et absorption acoustique théoriques et mesurées de l'échantillon 4	89
Figure 5-8 : Indice de performance théorique (modèle AML), positionnement de l'échantillon 489	
Figure 5-9 : Impédance et absorption acoustiques théoriques et mesurées de l'échantillon 13.....	90
Figure 5-10 : Indice de performance théorique (modèle AML), positionnement de l'échantillon 13	90
Figure 5-11 : Impédance et absorption acoustique théoriques et mesurées de l'échantillon 16	91
Figure 5-12 : Comparaison des échantillons 10, 11 et 12	92
Figure 5-13 : Comparaison des échantillons 13 & 14.....	93
Figure 5-14 - Tube d'impédance avec quatre échantillons empilés	94
Figure 5-15 : Configuration 22.....	94
Figure 5-16 : Impédance et absorption acoustique de configuration 22	95
Figure 5-17 : Configuration 29.....	95
Figure 5-18 : Impédance et absorption acoustique de configuration 29	95
Figure 5-19 : Configuration 23.....	96
Figure 5-20 : Impédance et absorption acoustique de configuration 23	97
Figure 5-21 : Photographie d'un échantillon de compression	99
Figure 5-22 : Historique d'un essai de compression de structure sandwich à âme en matériau imprimé par fabrication additive	99
Figure 5-23 : Courbes de compression en contrainte déformation des échantillons.....	100
Figure 5-24 : Rigidité équivalente obtenues lors des essais de compression.....	100
Figure 5-25 : Éprouvette de test de flexion	101
Figure A-1 : Résonateur de Helmholtz et son analogie mécanique	115

Figure B-2 : Résonateur quart d'onde.....	117
-------------------------------------------	-----

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

La liste des sigles et abréviations présente, dans l'ordre alphabétique, les sigles et abréviations utilisés dans le mémoire ou la thèse ainsi que leur signification. En voici quelques exemples :

.STL	Extension fichier pour fabrication additive
3DP	<i>Three-dimensional Printing</i>
ACARE	<i>Advisory Council for Aeronautics in Europe</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
AML	<i>Additive Micro-Lattice</i>
ATAG	Air Transport Action Group
BPF	<i>Blade Passage Frequency</i>
CCHP	Chaire de recherche sur les Composites Hautes Performances
CFM	Coentreprise General Electric–Snecma (motoriste aéronautique)
CFM56	Gamme de moteur CFM à haut taux de dilution
DCM	Dichlorométhane
DDOF	Double Degree Of Freedom
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
EPNLdB	<i>Effective Perceived Noise Level Decibels</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FMR	Fréquences Multiples de Rotation
FPA	Fréquence de Passage des Aubes
JCA	Modèle de Johnson-Champoux-Allard
JCAPL	Modèle de Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge
LAVA	Laboratoire d'Analyse Vibratoire et Acoustique
LEAP	<i>Leading Edge Aviation Propulsion</i> – moteur CFM
LM ²	Laboratoire de Mécanique Multiéchelles
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
MM	<i>Model Maker</i>
MML	<i>Multi Materials Liner</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

NIDA	Structure Nid d'abeille
OA	Orthogonal Alterné
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OD	Orthogonal Droit
OGV	<i>Outlet Guide Vane</i> : redresseur du flux secondaire
PLA	<i>Polylactic Acid</i> : Acide Polylactique
RCM	Recemat (société)
S30	Structure 30°
SDOF	Single Degree Of Freedom
SLA	<i>Stereolithography Apparatus</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
.STL	Nom d'extension de fichier utilisé pour la fabrication additive
UHBR	<i>Ultra High Bypass Ratio</i>
UV	Ultra-violets
VER	Volume Élémentaire Représentatif
μFDM	Micro Fabrication par Déposition de filaments

LISTE DES VARIABLES

C_p	Capacité thermique isobare de l'air ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
C_v	Capacité thermique isochore de l'air ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
$D_{spéc}$	Diamètre spécifique d'impression
I_{BF}	Indice de performance acoustique Basse Fréquence
I_G	Indice de performance acoustique Global
I_{HF}	Indice de performance acoustique Haute Fréquence
I_{MF}	Indice de performance acoustique Moyenne Fréquence
J_i	Fonction de Bessel d'ordre i
K_{eq}	Module de compressibilité équivalent (Pa^{-1})
P_0	Pression atmosphérique (Pa)
Q_v	Débit volumique (m^3/s)
V_f	Volume de la phase fluide (m^3)
V_t	Volume total du milieu poreux
Z_{fluide}	Impédance du fluide équivalent
Z_{liner}	Impédance du traitement acoustique
a_0	Section d'un microcanal (m^2)
c_0	Célérité d'une onde acoustique dans l'air ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
$e_{cloison}$	Épaisseur des cloisons (m)
e_{ech}	Épaisseur de l'échantillon (m)
e_{liner}	Épaisseur du traitement (m)
$e_{spéc}$	Épaisseur spécifique de traitement (m)
k_0	Perméabilité visqueuse statique (m^2)
k'_0	Perméabilité thermique statique (m^2)
k_t	Nombre d'onde thermique ($\text{rad} \cdot \text{m}^{-1}$)
r_0	Rayon d'un filament imprimé (m)
r_{tube}	Rayon d'un microcanal (m)
\vec{u}	Vitesse particulaire du fluide ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
w_f	Taux de remplissage
α'_0	Tortuosité thermique statique

α_{∞}	Limite haute fréquence de la tortuosité
ρ_0	Masse volumique de l'air (kg/m ³)
ρ_{eq}	Masse volumique équivalente (kg/m ³)
ρ_{moy}	Masse volumique moyenne au sein du VER (kg/m ³)
Γ	Constante de propagation
Γ'	Atténuation de l'énergie d'onde
Γ''	Changement de phase de l'onde
Δp	Différentiel de pression (Pa)
Λ	Longueur caractéristique visqueuse (m)
Λ'	Longueur caractéristique thermique (m)
E	Module d'Young (MPa)
G	Module de Coulomb (MPa)
Pr	Nombre de Prandtl
R	Coefficient de réflexion
S	Section de l'échantillon (m ²)
T	Température (°K)
U	Déformation de la phase solide
a	Paramètre de maille de la microstructure (m)
e	Épaisseur de l'échantillon (m)
f	Fréquence (Hz)
f_{red}	Fréquence réduite
j	Imaginaire pur tel que : $j^2 = -1$
k	Nombre d'onde (rad. m ⁻¹)
n	Indice polytropique
p	Pression (Pa)
p'	Pression particulaire acoustique (Pa)
s	Nombre d'onde en cisaillement (rad. m ⁻¹)
u	Déplacement particulaire axial dans le microcanal
v	Déplacement particulaire radial dans le microcanal
v'	Vitesse particulaire acoustique (m. s ⁻¹)
w	Espacement interfilamentaire (m)

α	Coefficient d'absorption acoustique
$\lambda_{spéc}$	Longueur d'onde spécifique pour microcanaux
γ	Coefficient adiabatique de l'air
δ	Épaisseur de la couche limite visqueuse (m)
δ'	Épaisseur de la couche limite thermique (m)
η	Viscosité dynamique du fluide (Pa. s)
κ	Conductivité thermique de l'air ($\text{W. m}^{-1}. \text{K}^{-1}$)
μ	Viscosité cinématique du fluide (m^2/s)
ξ	Coordonnée locale axiale adimensionnelle
ς	Coordonnée locale radiale adimensionnelle
σ	Résistivité au passage de l'air (N. s. m^{-1})
ω	Fréquence angulaire (rad/s)
ω_s	Fréquence angulaire réduite
ϕ	Porosité du milieu poreux

LISTE DES ANNEXES

Annexe A - Résonateur de Helmholtz.....	115
Annexe B - Résonateur quart d'onde	117

INTRODUCTION

Depuis quelques années, le trafic aérien a connu une croissance exponentielle en raison d'une augmentation rapide de la population mondiale et du développement du transport aérien commercial, tant dans les pays développés que dans les pays émergents. Cette tendance se poursuivra puisque l'OACI (l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale) prévoit une progression annuelle du nombre de vols aériens de 5% pendant les vingt prochaines années. En parallèle, avec une urbanisation accrue, notamment aux abords des aéroports, les riverains sont particulièrement affectés par le bruit inhérent à de telles infrastructures. Par conséquent, des normes acoustiques de plus en plus sévères sont mises en place afin de réduire les nuisances sonores lors des phases de vol les plus critiques (le décollage et l'atterrissage en particulier). Dès lors, les avionneurs s'efforcent de répondre à de telles réglementations et améliorent leurs produits. Ainsi, le comité ACARE (*Advisory Council for Aeronautics in Europe*) vise une réduction de 10 dB des émissions sonores d'ici 2020. Si le respect de ces normes est de la responsabilité de l'avionneur, les motoristes aéronautiques sont directement impliqués dans ce processus car le bruit moteur est une composante majeure du bruit d'un avion.

C'est dans ce contexte que d'importants efforts de recherche industrielle sont entrepris pour développer les meilleurs systèmes absorbants pour atténuer le bruit généré par le moteur. Dans cette optique, différents concepts émergent aujourd'hui car les traitements conventionnels ne suffisent plus pour espérer une baisse suffisamment significative de l'intensité sonore de l'appareil. Ainsi, de nouvelles zones de traitements et de nouveaux concepts de rupture sont investigués pour parvenir aux objectifs fixés par l'ACARE.

Après avoir réalisé l'inventaire des concepts de réduction du bruit et évalué leur potentiel acoustique, nous souhaitons approfondir l'intégration de solutions prometteuses dans des zones moteur possédant des contraintes de conception fortes liées aux fonctions réalisées.

L'introduction de matériaux poreux comme amortisseurs sonores, dont les procédés d'obtention sont en plein essor, est aujourd'hui susceptible d'avoir un impact conséquent sur la réduction du bruit des moteurs, voire des aéronefs plus largement. Dans cette optique, des travaux de recherche visent à comprendre et à concevoir des structures adaptées aux besoins rencontrés dans divers industries comme le transport, le bâtiment, ou encore l'aéronautique. À l'orée de ce

nouveau besoin, une nouvelle technique de fabrication additive désignée communément dans le grand public par « impression 3D » offre une opportunité unique de création de systèmes répondant à un cahier des charges complexes.

L'objectif de cette étude est donc d'identifier les possibilités offertes par la fabrication additive dans le but de créer un traitement acoustique à réaction non localisée répondant à des contraintes spécifiques d'intégration moteur. Quels matériaux doivent être utilisés pour résister à l'environnement d'un aéronef ? Comment produire et associer ces matériaux pour une conception donnée ? Quels défis et orientations technologiques ces nouveaux traitements posent à un concepteur de turbomachines ? Le travail mené permettra d'expliquer les phénomènes dissipatifs mis en jeu par ces structures acoustiques ainsi que leur pertinence à répondre aux besoins spécifiques de la création d'un traitement acoustique passif sur turboréacteur. Les performances de certaines configurations seront montrées et confrontées aux solutions industrielles actuelles afin d'apprécier la maturité des technologies.

Ce mémoire se divise en 6 parties. Le Chapitre 1 est constitué d'une revue de la littérature portant sur les différents aspects de la réduction du bruit engendré par un moteur d'avion et une présentation de la fabrication additive adaptée à l'acoustique et les modèles acoustiques pour milieux poreux. Le deuxième chapitre définit les objectifs et la démarche suivie pour mener aux systèmes acoustiques réalisés. Dans le Chapitre 3, les technologies de fabrication additive sont sélectionnées par leur pertinence pour réaliser des structures acoustiques. Les modèles analytiques destinés à la prédiction du comportement acoustique des microstructures additives sont donnés dans le chapitre 4. Les résultats expérimentaux mécaniques et acoustiques confrontant le comportement réel des échantillons fabriqués et la modélisation sont regroupés au Chapitre 5. Pour finir, la dernière partie montre les possibilités réalisées et futures de ce type de traitement acoustique par fabrication additive avec discussion sur les avenues futures du projet.

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Cette revue de la littérature présente un état de l'art des différents domaines nécessaires à la compréhension de ce mémoire. Dans un premier temps, une présentation rapide des turbomachines qui motorisent aujourd'hui les avions civils. Puis, les enjeux acoustiques posés par ces systèmes seront exposés avec la théorie descriptive des phénomènes aéroacoustiques. Nous parlerons ensuite des solutions de traitement acoustique présentement mis en place au sein des moteurs et nacelles d'aéronefs. La pertinence des cristaux soniques et mousses sera montrée pour finalement introduire les opportunités uniques offertes par les nouveaux procédés de fabrication additive et les modèles acoustiques de ces structures.

1.1 Acoustique des moteurs d'avion

1.1.1 Notions générales aéroacoustiques

Depuis 20 ans, les nouvelles réglementations à l'égard du bruit généré par les aéronefs deviennent de plus en plus sévères afin de limiter l'impact de la pollution sonore sur les populations limitrophes des zones aéroportuaires. Le son émis par un avion provient de plusieurs sources comme le fuselage, le train d'atterrissage ou encore les moteurs. Le bruit du moteur est un contributeur majeur en phase d'approche et de décollage. L'évolution des turbomachines vers des engins à fort taux de dilution rend le bruit issu de la soufflante encore plus prédominant avec l'augmentation de sa taille. Aujourd'hui, les traitements acoustiques classiques sous forme de revêtements formant des résonateurs de Helmholtz sont performants mais présentent des limitations pour satisfaire l'ensemble des nouvelles exigences de réduction du bruit. Dès lors de nouveaux concepts sont étudiés pour atteindre les objectifs fixés par l'ACARE (*Advisory Council*

for Aviation Research and Innovation in Europe) en 2020, soit -50% sur le niveau sonore en EPNdB¹ de l'an 2000.

Sur les aéronefs civils actuels, les sources de bruit issues d'un avion se décomposent comme présenté à la Figure 1-1.

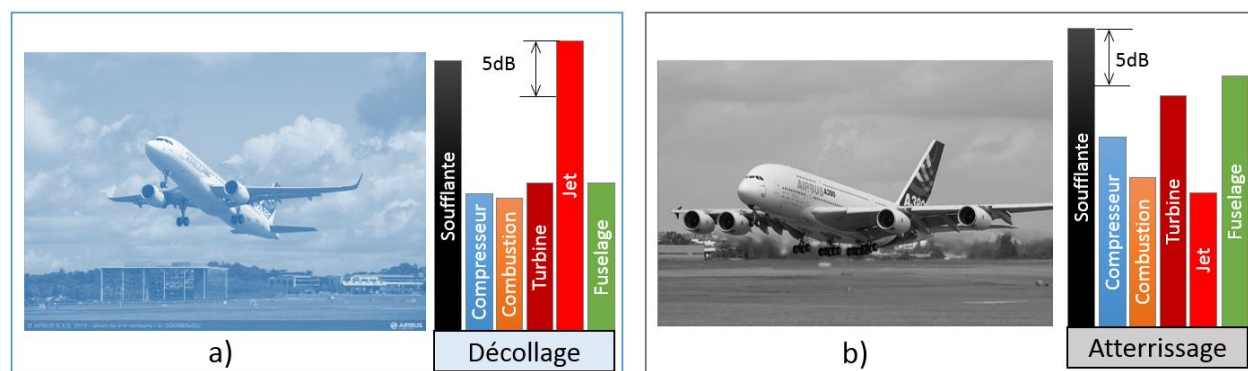


Figure 1-1 : Pondération des composantes du bruit au décollage et à l'atterrissage d'un avion

a) Contributions typiques au décollage et b) Contributions typiques à l'atterrissage

(modèles avions à titre d'illustration) (IROQUA projet, 2006)

Les sources inhérentes au moteur représentent donc la majeure partie des émissions sonores enregistrées lors du passage de l'appareil. Sur les derniers moteurs à fort taux de dilution, les contributions avion et moteur sont équivalentes en approche. Dès lors, un effort important des motoristes et des avionneurs pour contrôler le bruit émis par un appareil est nécessaire. Le bruit moteur est composé des contributions sonores des différents organes du système. Chacun possédant une signature fréquentielle spécifique liée aux phénomènes aéroacoustiques qui y résident.

¹ L'EPNdB ou Effective Perceived Noise en décibels est une unité de mesure spécifique utilisée pour qualifier le bruit d'un avion. Elle est définie dans l'Annexe 16 de l'OACI (Girvin, 2009)

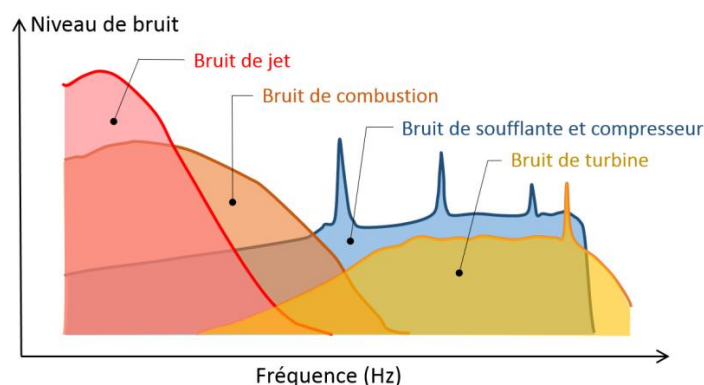


Figure 1-2 : Signature fréquentielle classique des différents organes du moteur (Julliard, 2003)

Il est donc possible de distinguer des spectres typiques pour chacun des organes moteur. En particulier, le bruit de soufflante est marqué par des bruits tonaux importants qui seront perceptibles dans la signature sonore ressentie au passage d'un avion.

Ces sources sonores ne sont pas générées au même endroit du moteur, ainsi le bruit issu de la chambre de combustion devra se propager en amont dans la veine d'air du compresseur et en aval dans la turbine. En revanche le bruit issu de la soufflante se propage directement dans le conduit de la nacelle puis jusqu'au sol. Ces propagations au sein du moteur modifient sensiblement la directivité des différentes sources.

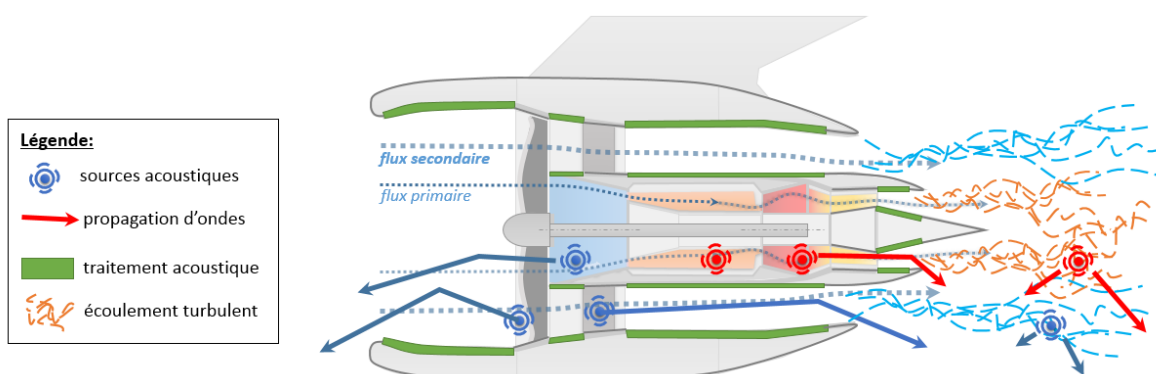


Figure 1-3 : Répartition des traitements acoustiques et sources aéroacoustiques (Roger, 2012)

La nature des sources acoustiques est également différentes (Bodony, 2005; Chu & Kovásznay, 1958; Goldstein, 1976; Peters, 1993) et possèdent leur propre directivité. Ainsi pour une turbosoufflante moderne, le bruit de jet sera beaucoup moins directif qu'il l'était dans les moteurs à faible taux de dilution des années 1980. De même, le bruit de soufflante se retrouve avec une

directivité très large liée principalement à l'augmentation du diamètre de la veine secondaire et donc une diminution du rapport longueur sur diamètre nacelle.

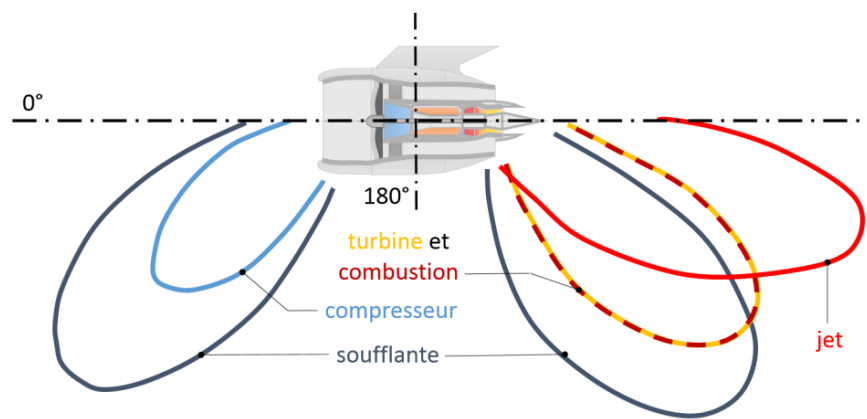


Figure 1-4 : Directivité des différentes composantes du bruit moteur

Le traitement développé dans la suite de ce mémoire vise une atténuation du bruit de soufflante. Celui-ci est en effet largement perceptible tant par les riverains des zones aéroportaires que les passagers à l'intérieur de la cabine. Le but du nouveau traitement investigués est de réduire sur une large gamme fréquentielle et atténuer certaines composantes du bruit de soufflante comme par exemple le bruit de raie d'interaction, le BLB (Bruit Large Bande) ou encore les FMR (Fréquences Multiples de Rotation : bruit de choc en régime transsonique ou *buzzsaw noise*).

1.1.2 Le bruit de soufflante

Lorsque l'on considère l'étage soufflante d'un turboréacteur il est nécessaire de prendre en compte les composants environnants d'un turboréacteur qui vont interagir avec celui-ci. Ainsi, la nacelle est prise en compte car elle a pour rôle acoustique de guider et atténuer en amont comme en aval le bruit du turboréacteur.

Le bruit de la soufflante a une contribution importante sur l'empreinte sonore des moteurs à fort taux de dilution, avec une contribution très significative au décollage (relativement aux contributions des autres sources comme le Jet). Pour atténuer ce bruit, il est dès lors nécessaire de mieux comprendre les phénomènes physiques qui en sont la cause.

La soufflante est, d'une part, responsable d'un bruit large bande qui intervient à toutes les fréquences. Mais également d'un bruit de raie qui intervient à certaines fréquences bien spécifiques

dénommées BPF pour *Blade Passage Frequency*. Un spectre acoustique typique d'une soufflante de turboréacteur pour deux régimes de rotations particuliers (subsonique et supersonique) est représenté sur la Figure 1-5.

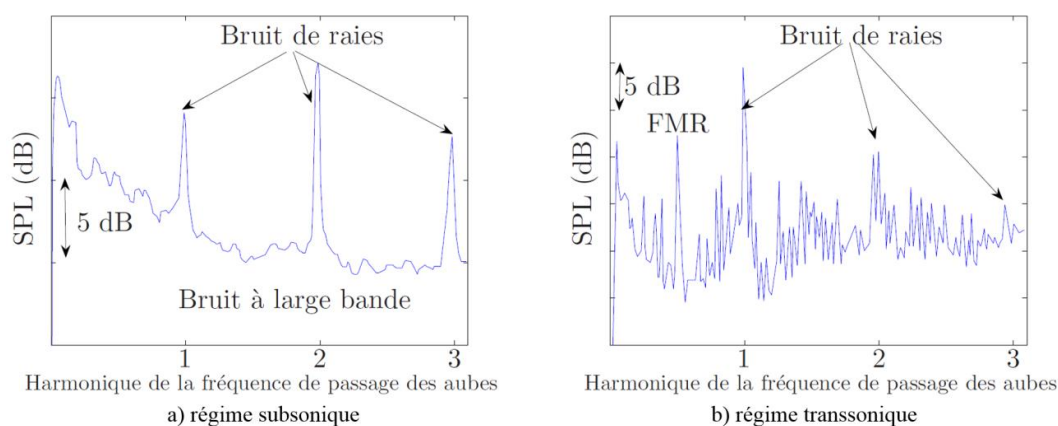


Figure 1-5 : Spectre typique d'une soufflante en régime subsonique (Reboul, 2010)

Le bruit large bande est dû à la turbulence de l'écoulement. Le bruit de raies est quant à lui dû aux périodicités spatiales et temporelles caractéristiques de l'écoulement dans un turboréacteur. On observe également que l'on peut assez facilement discerner différents régimes soniques. En effet des raies supplémentaires apparaissent en régime transsonique.

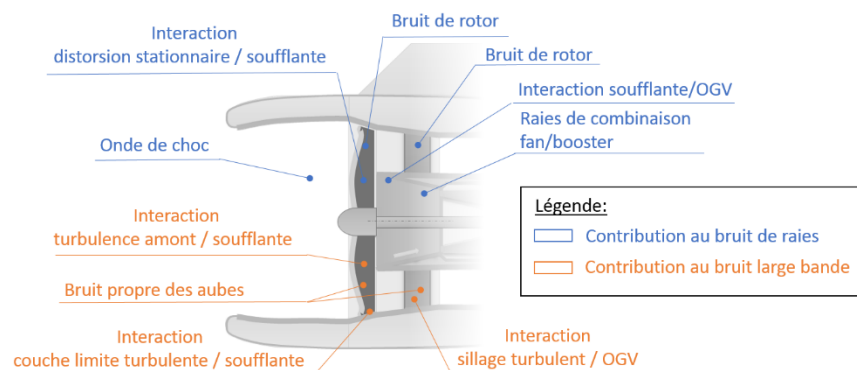


Figure 1-6 : Différents phénomènes générant le bruit de soufflante (Ventres, Theobald, 1982)

Face à ces multiples phénomènes d'interaction produisant des sources acoustiques illustrés à la Figure 1-6, les optimisations visant à la réduction de chacun des contributeurs est complexe. Le but du traitement est donc de réduire l'intensité du champ sonore initial provenant du moteur

pour limiter l'impact sur les passagers et les populations au sol. L'onde acoustique issue du bruit de soufflante se propage en effet dans le conduit nacelle jusqu'au bord de l'entrée d'air en amont et en aval jusqu'en sortie d'éjection.

Les zones traitées acoustiquement sur une nacelle de turboréacteur moderne sont indiquées dans la

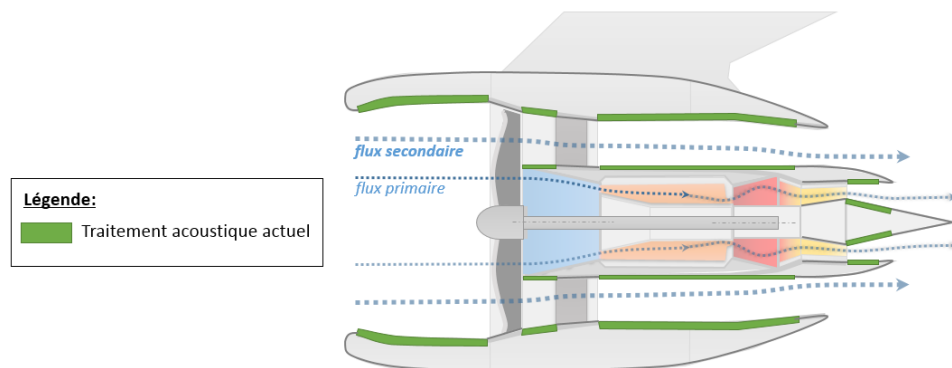


Figure 1-7.

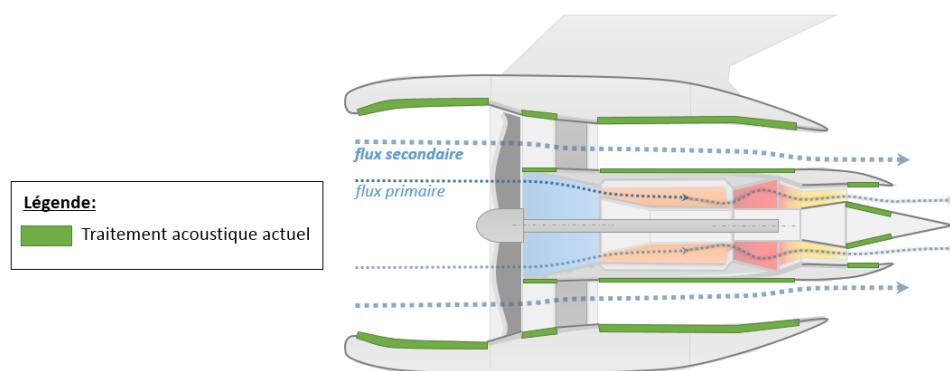


Figure 1-7 : Zones d'implantations de traitements acoustiques sur moteur (Bielak, Gallman, Kunze, & Murray, 2002)

La majeure partie des zones traitées se situe sur la nacelle du moteur et dans le carter moteur. Leur but est d'atténuer les ondes sonores lorsque'elles commencent à se propager dans la manche d'air en amont ou dans le conduit aval. Le traitement acoustique actuel se constitue de revêtements à réaction localisée qui offrent de bonnes performances mais qui deviennent limitées de part les contraintes imposées par l'architecture. L'implantation de nouveaux types de traitement est donc investigués. A ce titre, les requis nécessaires à l'implantation d'un revêtement ont d'abord été collectés. On retrouve en effet de nombreuses contraintes d'intégrations comme, la tenue aux

intempéries, l'impact de volatile, la rétention fluidique, les performances aéronautiques ou encore les dimensions géométriques.

1.1.3 Traitements acoustiques actuels pour la réduction du bruit de soufflante

Depuis une trentaine d'année, pour réduire le rayonnement des sources internes au moteur, les nacellistes et motoristes tapissent par conséquent au maximum les parois de conduit avec des matériaux absorbants. Les travaux d'optimisation effectués dans ce domaine ont permis de développer des technologies à réaction localisée offrant des bonnes performances de réduction de bruit.

Il existe principalement deux types de structures passives (sans apport externe d'énergie) utilisées pour dissiper une énergie acoustique. Les structures dites à réaction localisée fonctionnent comme des résonateurs sans interaction avec la structure environnante. D'autres traitements investigués dans le cadre de travaux de recherche par les motoristes et nacellistes sont à base de matériaux absorbant les ondes sonores par interaction non-localisée entre le fluide porteur d'onde et un squelette solide par dissipation visqueuse et thermique. Le principe physique de ces deux types de traitement est schématisé à la Figure 1-8.

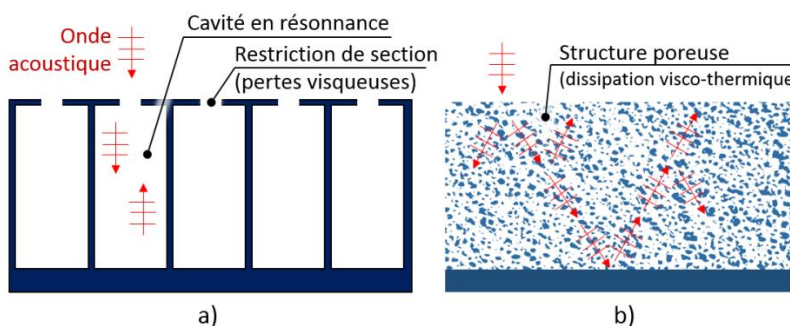


Figure 1-8 : Exemple de diffusion d'onde dans un matériau
a) à réaction localisée et b) à réaction non localisée (Malmarmy, 2000)

Les traitements les plus communément utilisés dans l'aéronautique sont des panneaux statifiés à âme nid d'abeille possédant une peau perforée du côté exposé au bruit. Ils fonctionnent sur le principe des résonateurs de Helmholtz (cf Annexe – Résonateurs de Helmholtz et quart d'onde) et sont donc des traitements dits à réaction localisée. La cavité formée par le volume d'air d'une

cellule de nid d'abeille associé à la couche résistive perforée vient entrer en résonance en présence d'un flux d'air perpendiculaire à la cavité (Figure 1-9).

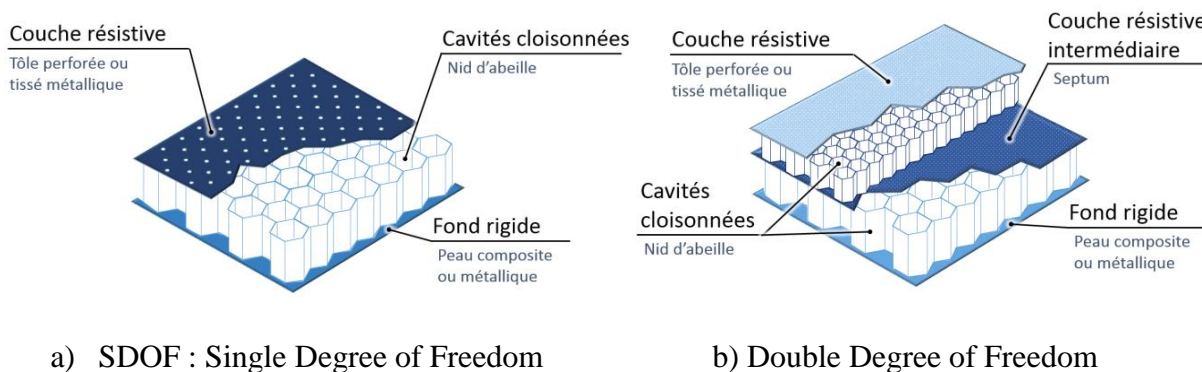


Figure 1-9 : Traitements acoustiques actuels

Le nom donné à ces structures est SDOF pour *Single Degree of Freedom* pour une cavité ou DDOF *Double degree of Freedom* pour une association de cavités (permettant une absorption sur une gamme de fréquence plus large).

Ces traitements dits à réaction localisée, présentent des limites dans les basses fréquences. Il faudrait en effet augmenter fortement la hauteur des cavités (basse fréquence équivaut en effet à grande longueur d'onde) ce qui n'est pas forcément compatible avec les contraintes d'encombrement. De plus ces traitement à cavités résonnantes ciblent une ou quelques fréquences spécifiques.

En conséquence, les principaux acteurs aéronautiques et notamment les motoristes étudient de nouveaux traitements, comme les matériaux à réaction non localisée. Ces matériaux possèdent comme principal avantage une absorption importante sur une large bande de fréquence notamment en haute fréquence (Figure 1-11) pour la propagation de l'onde dans le conduit amont et aval moteur. Ils se présentent sous la forme de matériaux poreux dans lesquels l'onde acoustique vient interagir avec l'ensemble du squelette du matériau. Les matériaux poreux se distinguent en effet par l'association de deux phases, une phase solide et une autre liquide ou gazeuse. C'est de ce couplage de matière que les matériaux poreux tirent leurs principales propriétés et trouvent ainsi de multiples applications dans divers domaines dont l'acoustique. À l'heure actuelle, ils ne sont toutefois pas employés comme traitements acoustiques moteurs du fait des fortes contraintes à satisfaire (environnement, masse, etc...). Plusieurs types de matériaux poreux avec potentiel acoustique sont

décrits dans les sections suivantes selon la forme physique dans laquelle ils se présentent et les phénomènes en cause dans l'atténuation acoustique.

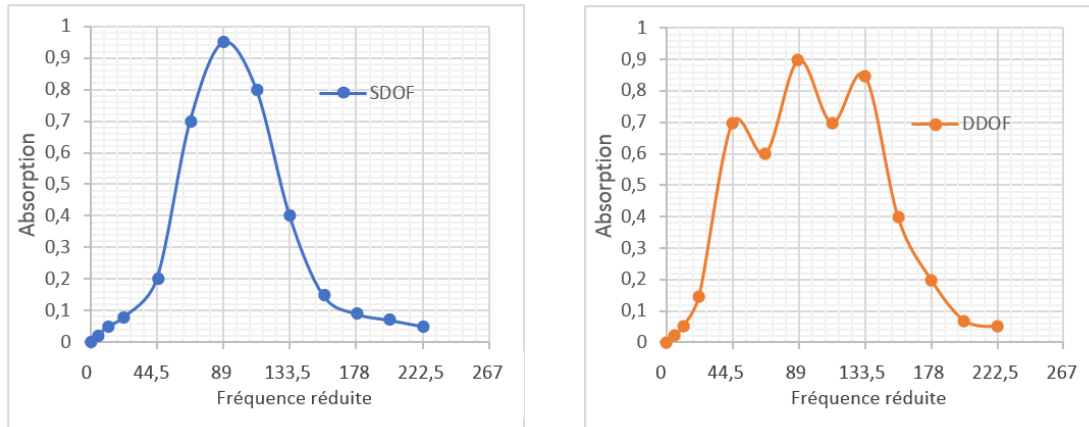


Figure 1-10 : Spectre typique d'absorption des traitements SDOF et DDOF

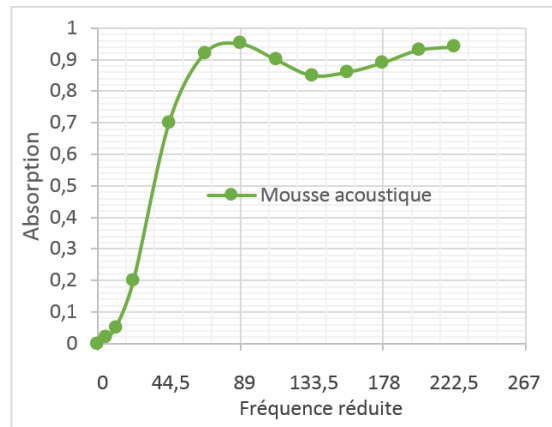


Figure 1-11 : Spectre typique d'absorption d'une mousse acoustique

Dans le reste de cette étude, les fréquences sont données en fréquences réduites kr par normalisation vis-à-vis du rayon spécifique de soufflante d'une nacelle moteur et du nombre d'onde.

1.2 Traitements acoustiques à réaction non-localisée

Il existe une grande variété de matériaux poreux qui possèdent aujourd'hui des applications multiples dans l'industrie moderne telles que :

- Conception de structures légères
- Echangeurs thermiques

- Ames pour « structures sandwich »
- Contrôle en déformation
- Amortissement mécanique
- Contrôle vibratoire
- Absorption acoustique
- Absorption d'énergie (choc/impact)
- Confinement de hautes températures
- Bois artificiel (ameublement)
- Ecrans thermique
- Préformes jetables (moulage à la cire perdue)
- Implants médicaux biocompatibles
- Filtres
- Blindage électrique
- Support d'électrode et barrières catalytiques
- Flotteurs (nautique)

La mise en commun de deux phases matières à propriétés physiques distinctes permet en effet de créer des matériaux uniques en fonction de l'interaction existante ou non au sein du milieu poreux.

La Figure 1-12 montre les associations et possibilités offertes par un matériau poreux.

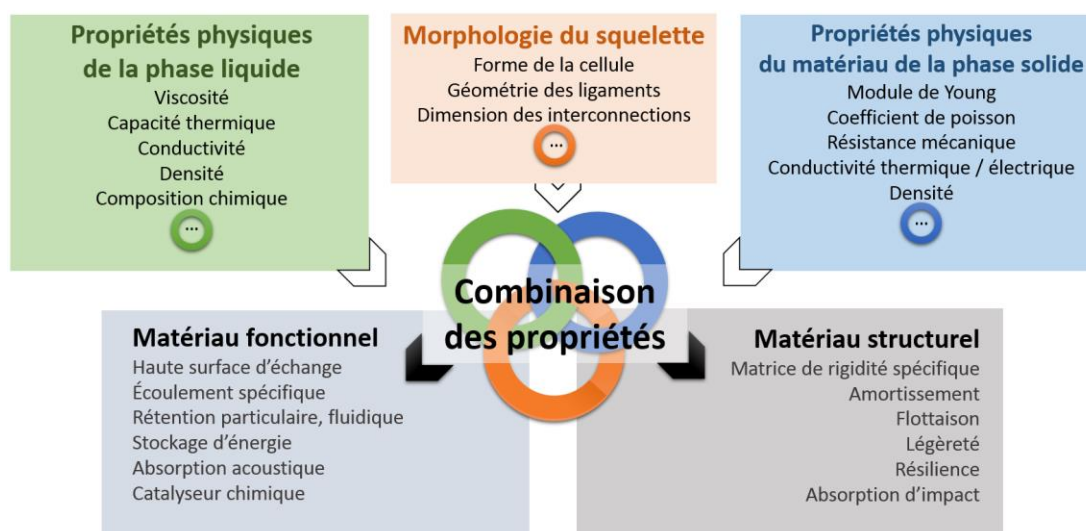


Figure 1-12 : Couplages des phases matières au sein d'un matériau poreux et opportunités associées

Les matériaux poreux peuvent donc se présenter sous des formes très variées et couvrent des besoins très différents. Ils sont résumés par la Figure 1-13.

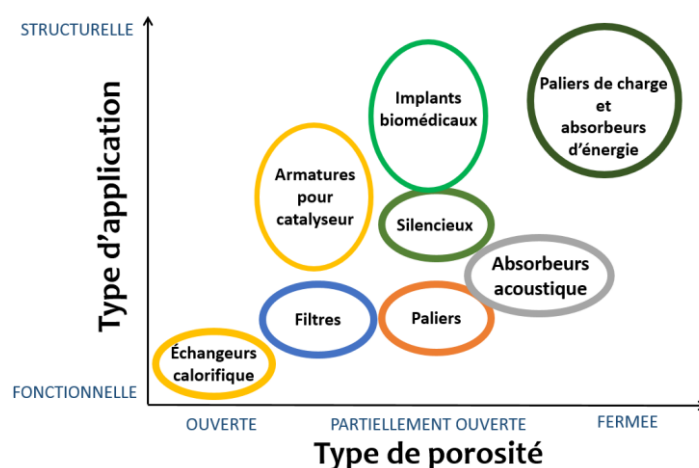


Figure 1-13 - Répartition des applications des matériaux poreux selon la microstructure

La morphologie de la microstructure influence fortement le domaine d'application des milieux poreux car les interactions entre les deux phases solide et fluide sont largement conditionnées par la forme et le matériau formant le squelette rigide.

Le Tableau 1-1 donne une première appréciation des mousses et de leurs propriétés en fonction du matériau solide poreux.

Tableau 1-1 : Propriétés générales de poreux en fonction du matériau constitutif de la phase solide (Banhart, 2006)

	Papier	Polymère	Métal	Verre	Céramique
<i>Densité</i>	Faible	Faible	Haute	Moyenne	Moyenne
<i>Perméabilité</i>	Faible	Faible	Haute	Haute	Haute
<i>Résistance mécanique</i>	Faible	Moyenne	Haute	Haute	Haute
<i>Taille de pore</i>	Grande	Contrôlable	Contrôlable	Contrôlable	Contrôlable
<i>Résistivité thermique</i>	Faible	Faible	Haute	Haute	Très haute
<i>Stabilité chimique</i>	Faible	Moyenne	Haute	Haute	Très haute
<i>Durée de vie</i>	Limitée	Limitée	Longue	Longue	Longue
<i>Usinabilité</i>	Excellente	Excellente	Moyenne	Délicate	Délicate
<i>Coût</i>	Bas	Bas	Moyen	Haut	Moyen

Les matériaux poreux possèdent en effet des caractéristiques telles qu'une surface d'échange importante, une densité faible, une capacité à absorber l'énergie mécanique ou acoustique, ou encore une conductivité thermique ou électrique qui en font un atout dans la conception de nombreux produits.

Par ailleurs, un autre moyen de classer les matériaux poreux correspond au diamètre moyen de pores recherchés. Les porosités des matériaux poreux commercialisés aujourd'hui vont de quelques nanomètres à quelques millimètres. Au-delà, on considère plus généralement une structure et non un milieu poreux. Cependant, la taille des pores demandée restreint fortement les procédés capables de générer ce type de porosité comme le montre la Figure 1-14.

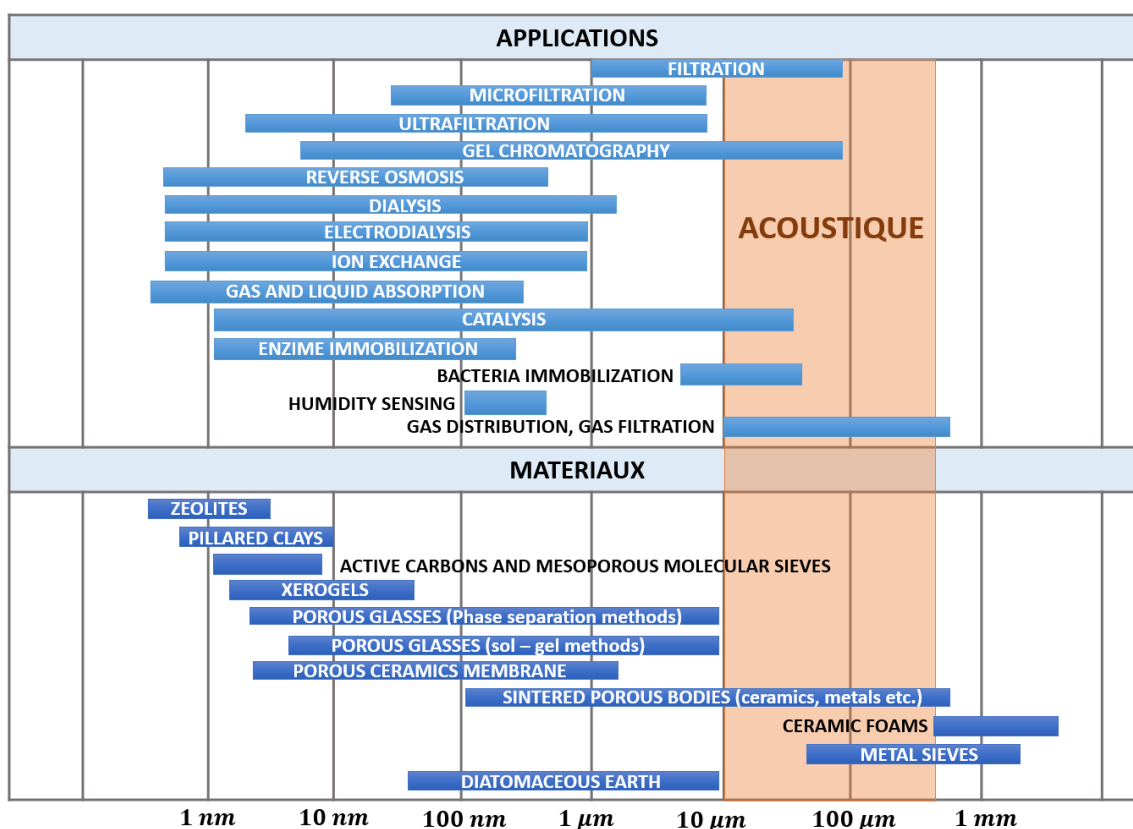


Figure 1-14: Classification par taille de pores demandée (Ishizaki, Komarneni, & Nanko, 2013)

Sur la Figure 1-14, la zone orange montre la taille de porosité ciblée pour l'acoustique pour obtenir une atténuation acoustique performante. Ce graphique met en évidence deux analyses importantes avant la poursuite de la présentation des milieux poreux. La porosité souhaitée généralement en acoustique va de quelques dizaines de micromètres à un peu moins d'un

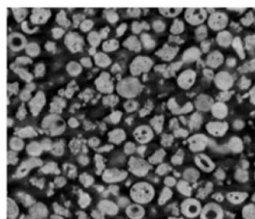
millimètre. Les autres domaines d'application pour ce type de réseau poreux sont limités à la filtration et la catalyse; ils sont utilisés par l'industrie pétrolière et gazière essentiellement. Le marché de l'acoustique n'étant pas un marché aussi important en terme de chiffre d'affaire, l'intérêt des industriels du secteur pour développer des matériaux complexes aux procédés coûteux est moindre. La deuxième constatation est le faible nombre de matériaux et/ou procédé utiliser pour générer des mousses dans ces gammes de porosité. Récemment les mousses métalliques cellulaires et les mousses carbonées ont cependant étoffé l'éventail des matériaux disponibles.

Les capacités associées aux matériaux poreux sont donc vastes. En effet, il est possible d'obtenir des matériaux aux propriétés radicalement différents en modifiant une des phases constituantes, en saturant par exemple un squelette rigide constituant la phase solide avec un liquide ou un gaz. Une modification de la morphologie du squelette est une autre solution permettant d'impacter fortement les capacités du matériau pour des performances mécaniques, ou chimiques variables, cependant la morphologie du squelette est souvent directement liée au procédé d'obtention du matériau. La morphologie du squelette est donc utilisée ci-après pour distinguer différents types de matériaux poreux.

1.3 Morphologie des matériaux poreux

Trois types de morphologie peuvent être visibles lors de l'observation d'une microstructure poreuse. De ces morphologies typiques découlent des propriétés très différentes.

‣ Matériaux poreux granulaires :



Les matériaux poreux granulaires sont générés par l'agrégation de particules avec ou sans agent de liaison (Figure 1-15). Les structures poreuses ainsi générées sont souvent denses et réputées pour leur résistance mécanique.

Figure 1-15 : Image SEM de poudre de bronze frittée (Bodla, 2014).

‣ Matériaux fibreux :



Figure 1-16 : Microscopie de fibre de verre

Un autre type de poreux rencontré est celle des matériaux fibreux dont la fibre de verre ou la laine de roche font parties (Figure 1-16).

Ayant souvent des propriétés mécaniques faibles, l'enchevêtrement de leurs fibres souvent naturelles, donnent des propriétés thermiques et acoustiques très intéressantes. Le coût de ces matériaux est généralement assez bas, ce qui en fait des matériaux de choix pour l'isolation des bâtiments.

‣ Matériaux poreux cellulaires :

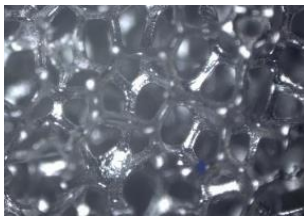


Figure 1-17 : Microscopie optique d'une mousse cellulaire (mousse d'alliage nickel)

Les matériaux cellulaires possèdent un squelette dont les ligaments sont interconnectés et liés mécaniquement laissant apparaître un réseau de pores comme à la Figure 1-17. Ces matériaux sont en pleine expansion et trouvent des cas d'applications variés. Les échangeurs thermiques, les structures galvaniques des batteries, les filtres dans le domaine pétrolier utilisent cette famille de poreux.

L'obtention de ce type de mousse est souvent liée à un procédé de moussage. Un agent moussant est introduit au sein d'un matériau liquide ou pâteux, une phase d'expansion gazeuse crée par la réaction avec l'agent moussant forme de bulles au sein du matériau, on fige ensuite le matériau dans cet état pour obtenir une mousse à porosité fermée. Différentes techniques, thermiques, mécaniques ou chimiques permettent ensuite d'obtenir une porosité ouverte (réticulation thermique des mousses polyuréthanes par exemple). Ce type de matériaux poreux est très intéressant car outre un taux de porosité pouvant être très élevé, la structure cellulaire de la phase solide possède des propriétés mécaniques intéressantes ce qui en fait un type de matériau poreux où les échanges entre les phases solide et liquide sont importants tout en gardant des propriétés mécaniques supérieures aux réseaux fibreux.

Bilan :

De par leur nature, les mousses granulaires sont assez denses. Dans le cadre de notre application aéronautique, des mousses à faible densité sont privilégiées pour ne pas augmenter exagérément le poids. Quant aux mousses fibreuses, elles possèdent des propriétés mécaniques trop faibles mais un potentiel d'absorption acoustique élevé, on étudiera donc ces matériaux tout en sachant qu'ils se sauront être utilisés pour reprendre des efforts mécaniques dans le système. On s'oriente donc naturellement vers les matériaux cellulaires qui offrent à la fois une structure pour la tenue mécanique et un réseau de cellules interconnectées pour une atténuation sonore alliée à des densités faibles.

L'arrivée sur le marché de mousses métalliques à porosité raffinée a récemment relancé l'intérêt des industriels pour les matériaux poreux car ils permettent d'associer propriétés mécaniques et interaction entre un fluide et une structure solide ouvrant la voie à des applications pour lesquels les mousses classiques ne savaient répondre de manière satisfaisante.

1.4 Mécanismes de dissipation dans les mousses stochastiques pour l'acoustique

Au-delà de la morphologie générale du squelette solide des matériaux poreux, une autre distinction importante concerne la périodicité de la microstructure. Certains procédés permettent en effet d'obtenir une microstructure extrêmement régulière comme la structure micro-treillis 3D présentée à droite dans la Figure 1-18. Mais la majorité des procédés donnent des mousses possédant une répartition statistique des tailles de pores. Un volume élémentaire représentatif de la microstructure est nécessaire pour donner une structure générique comme c'est le cas dans la mousse présentée à gauche de la Figure 1-18. Ces mousses sont dès lors désignées par le terme de « mousses stochastiques ».

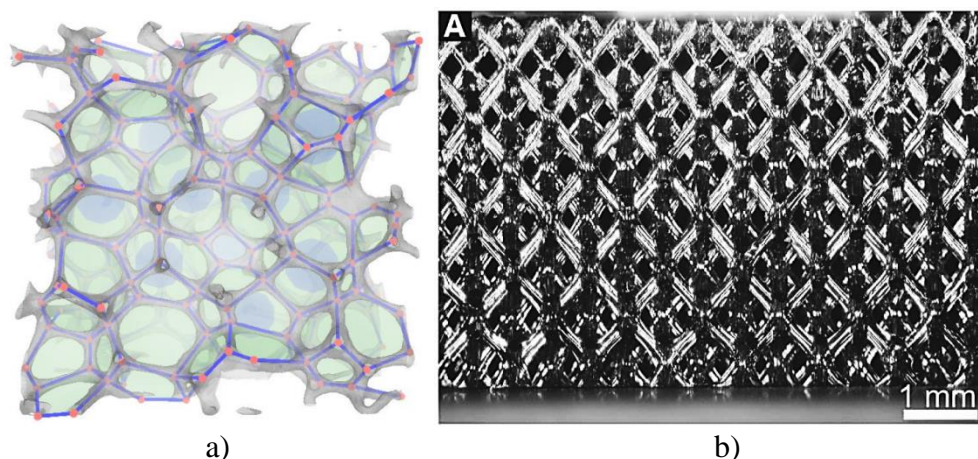


Figure 1-18 : a) Structure stochastique (Bock, 2011)
b) Structure périodique ordonnée (Schaedler et al., 2011)

Les principaux matériaux poreux stochastiques utilisés pour l'acoustique sont des milieux poreux du type fibreux ou cellulaires car ceux-ci possèdent un taux de porosité (volume de phase fluide sur phase solide) pouvant être très élevé. Pour être efficace, l'onde acoustique propagée par l'air constituant la phase fluide du milieu poreux doit pénétrer dans le réseau puis échanger de l'énergie; soit par dissipation visqueuse ou thermique; ce sont d'ailleurs ces interactions que l'on modélise afin de prédire le comportement acoustique des matériaux poreux.

Parmi les fibreux, les deux matériaux principaux utilisés dans le bâtiment sont la fibre de verre et la laine de roche. Ils possèdent un taux de porosité de l'ordre de 90% à 95% et des fibres dispersées aléatoirement de l'ordre de quelques dizaines de microns de diamètre (cf Figure 1-19).

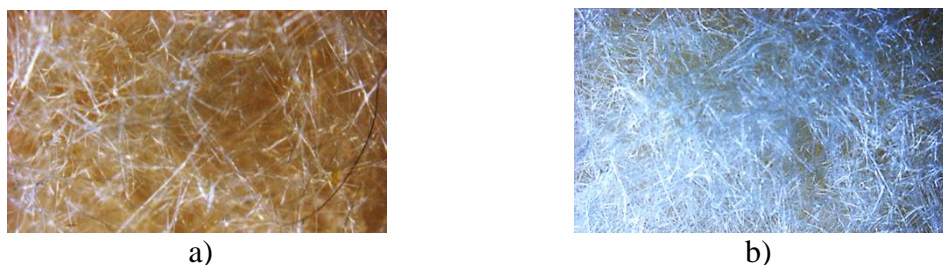


Figure 1-19 : Microscopie optique a) de fibre de verre et b) de laine de roche

Dans ce type de structure il est difficile de distinguer des cellules, l'essentiel de la dissipation s'effectue par frottement visqueux entre les multiples fibres et les particules oscillantes de l'onde acoustique. Ils permettent une atténuation sur une large bande de fréquence mais ne possède aucune tenue mécanique.

Les matériaux cellulaires sont également employés pour l'atténuation acoustique car leur structure permet une dissipation visqueuse liée au squelette rigide et des échanges thermiques dissipatifs au sein des pores de la microstructure. Les mousses polyuréthane dont la réticulation peut être contrôlée (Figure 1-20) permettent une absorption acoustique tout en assurant un maintien en forme minimal.

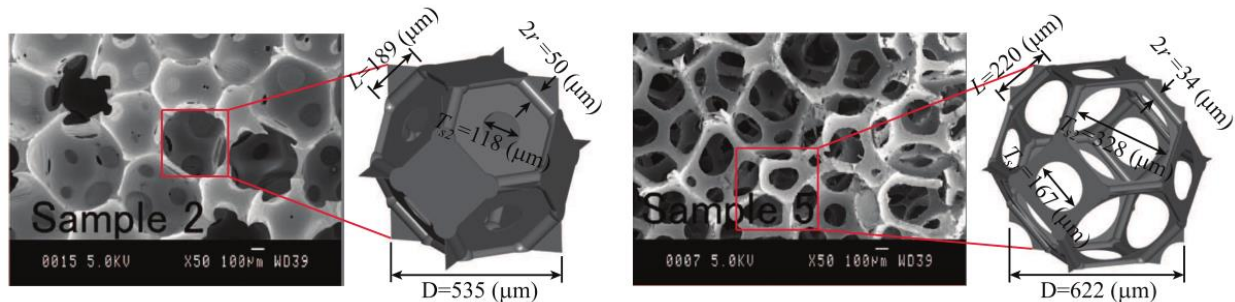


Figure 1-20 : Mousses polyuréthane avec différents degrés de réticulation (Hoang, 2012)

De nouveaux matériaux à fort potentiel acoustique et mécanique sont également apparus ces dernières années telles que les mousses à squelette rigide métallique ou carbone présentés en Figure 1-21.

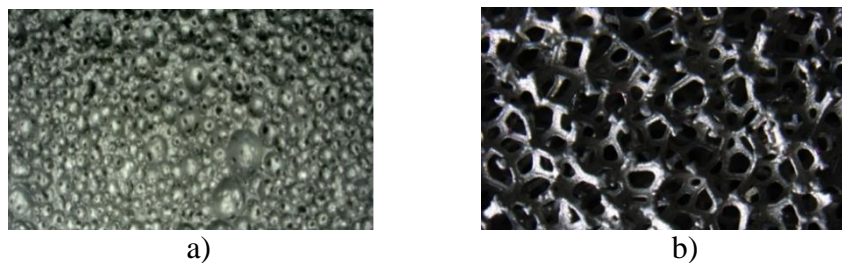



Figure 1-21 : a) Mousse de carbone, b) mousse métallique

Néanmoins les procédés associés à la production de ces mousses ne permettent pas de produire des mousses homogènes de forte épaisseur et leur prix reste très élevé vis-à-vis des matériaux acoustiques typiquement employés.

Tableau 1-2 : Possibilité de production de mousses métalliques par la société RECEMAT

Diamètre moyen des pores (mm)						Épaisseur réalisable
2,3	1,4	0,9	0,6	0,4	0,35	
						1,4
						1,6
						2
						2,5
						3
						4
						5
						7
						10
						13
						20

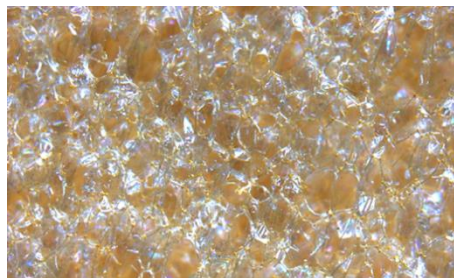
 mousse disponible

Pour les mousses métalliques, il est par exemple difficile d'obtenir des mousses très fines (diamètre de pores faible) sur une forte épaisseur avec une microstructure homogène (Tableau 1-2).

Un dernier type de mousse cellulaire est utilisé en acoustique et possède une porosité fermée ou partiellement ouverte. C'est le cas de certaines mousses polyimide et du QUASH® (marque commerciale) qui se présente sous la forme de poreux à microstructure cellulaire non réticulée. Les membranes interpores de ces matériaux sont si fines qu'ils permettent la transmission de l'onde en transmettant le champ de vitesse particulière de l'onde acoustique tout en dissipant une partie de l'énergie.



a)



b)

Figure 1-22 : Mousses à porosité partiellement ouverte ou fermée utilisées en acoustique QUASH® (mousse de polyuréthane (Bolton, 2002)) (à gauche), SOLIMIDE® (mousse de polyimide) (à droite)

Il existe donc plusieurs matériaux poreux stochastiques ayant des capacités acoustiques absorbantes. Néanmoins, mis à part les mousses métalliques et de carbone récentes, les autres matériaux acoustiques connus ne possèdent pas de propriétés mécaniques suffisantes pour assurer une fonctionnalité structurale en plus de l'acoustique.

1.5 Cristaux soniques, microtreillis et mousse syntactiques

Cette deuxième catégorie de structures regroupe les matériaux poreux possédant une grande régularité dans leur microstructure ce qui permet d'envisager une modélisation directe sans utilisation d'un volume représentatif équivalent ou de déterminer leurs paramètres morphologiques avec un traitement statistique.

Ces structures périodiques portent différents noms selon leur domaine d'application et sont plus généralement regroupées selon la désignation de « matériaux cellulaires périodiques ».

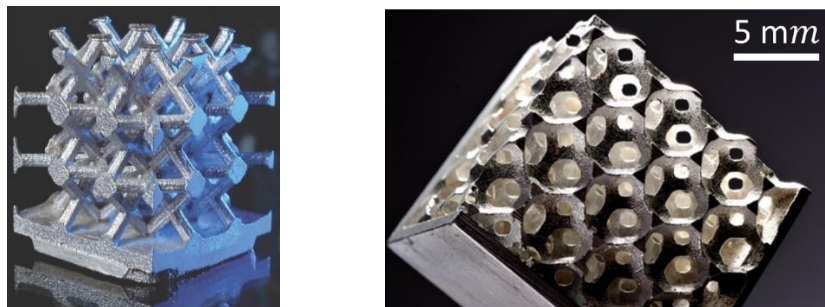


Figure 1-23 : Mousse métallique ordonnée (Meisel, 2012)

Les cristaux soniques sont des milieux poreux constitués de multiples éléments de diffraction répartis périodiquement, ils sont majoritairement utilisés comme filtre coupe bande pour des applications haute fréquence (Miyashita, 2005)(Akimov et al., 2008) en électronique photonique.

Un intérêt pour la transposition à des cristaux soniques dans le but d'atténuer les fréquences basses inférieures à 5000 Hz montre que ce type de structure peut être employé comme traitement acoustique (Charles, Bonello, & Ganot, 2006; Martinezsala et al., 1995; Tanaka & Tamura, 1999; Wu, Huang, & Lin, 2004).

Des procédés de tissages métalliques 3D permettant également d'obtenir des structures poreuses tridimensionnelle (Hyun, Choi, & Kang, 2009). Néanmoins les échelles de porosités sont d'un ordre 10 ou 100 fois supérieur à ceux nécessaire pour une application au domaine de l'acoustique. Ces structures sont souvent désignées dans la littérature par le terme « microtreillis tridimensionnel ».

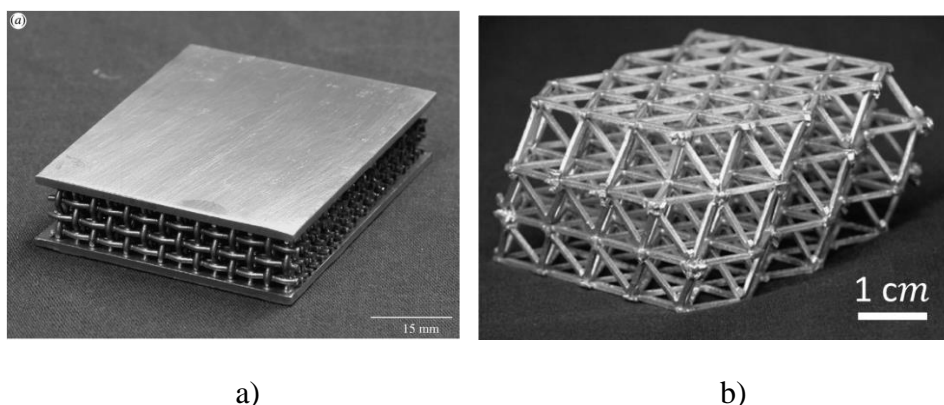


Figure 1-24 : a) Tissage 3D de fils métalliques et b) microtreillis 3D d'aluminium (à droite)

(Lee & Kang, 2010; Wadley, 2006)

Comme énoncé précédemment, de nouveaux matériaux issus de la recherche sur de nouveaux procédés de génération de matériau poreux à squelettes rigides tels que les mousses métalliques et carbone permettent d'envisager de nouveaux usages pour les matériaux poreux. Néanmoins leurs procédés d'obtention restent très délicats dans leur contrôle et les matériaux présents sur le marché ne permettent pas d'obtenir avec une grande flexibilité les dimensions souhaitées pour une application aéronautique. Par ailleurs, le développement des procédés de micro-fabrication et de fabrication additive ouvrent une autre voie intéressante dans la façon de générer des milieux poreux.

1.6 Fabrication additive pour production de matériau acoustique

La fabrication additive vulgarisée par le terme d'impression 3D dans le grand public, est une technologie de rupture qui est susceptible de permettre aux acousticiens de réaliser des structures.

Ces dernières années, des projets acoustiques ont pu utiliser la technologie d'impression 3D afin de réaliser des produits aux propriétés acoustiques améliorées. C'est le cas notamment de l'architecte Foteini Setaki qui a réalisée des structures de grande dimension pour améliorer l'acoustique de salles de bureaux ou encore créer des micro-absorbeurs sur le principe des guides quart d'onde à interférences destructives pour les ondes sonores. Certains de ces micro-absorbeurs fabriqués par stéréolithographie sont montrés à la Figure 1-25 et fonctionnent sur le principe des résonateurs quart-d'onde dont le principe est expliqué en annexe de ce mémoire.

De nouvelles possibilités de conception inhérentes à la fabrication additive permettent donc d'imaginer de nouveau systèmes d'atténuation du bruit car les contraintes de création pour les concepteurs ne sont plus les mêmes.

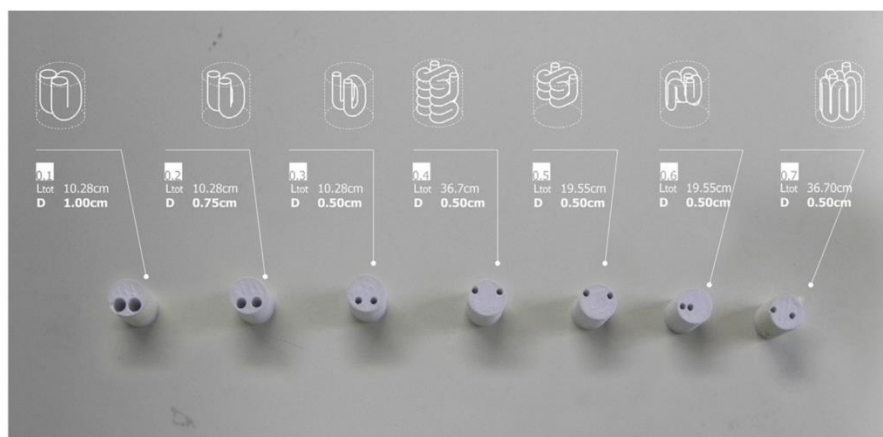


Figure 1-25 : Micro-absorbeurs quart-d'onde par fabrication additive (Setaki & Tenpierik, 2014)

Des recherches sur les revêtements acoustiques utilisés dans les nacelles de moteur d'avion ont également été investigués par le centre de recherche de la NASA à Langley (Jones, Howerton, & Ayle, 2012) au moyen de pièces prototypes réalisés par des procédés de fabrication additive (stéréolithographie et dépôt de fil fondu). Des revêtements avec des cavités de longueurs variables ont été fabriqués et testés pour étudier leur impédance acoustique et la gamme de fréquence pouvant être atténuée.



Figure 1-26 : Structures microcanaux destinées aux études et à la calibration des bancs acoustiques de la NASA (Langley)

Les procédés de micro-fabrication additive permettent donc d’entrevoir la production de matériau poreux à la microstructure non seulement contrôlée mais bénéficiant également des avantages proposés par la fabrication additive, notamment une complexité gratuite des formes générées, la possibilité de contrôler en tout point de l’espace le type de microstructure réalisée et la composition du matériau de la phase solide.

La méthodologie nécessaire à cette étude est maintenant présentée au sein du chapitre suivant.

1.7 Théorie de Biot et modèles pour poreux stochastiques

Ce chapitre montre comment déterminer et prédire le comportement acoustique des milieux poreux et microstructures poreuses générées par les procédés de micro fabrication additive sélectionnés précédemment.

Les travaux de modélisation des interactions fluide/structure intervenant au sein de matériaux poreux à distribution de pores statistique sont basés sur la théorie de Biot. Ces modélisations d’abord semi-phénoménologiques (Delany & Bazley, 1970; Miki, 1990) puis comportementaux (J. Allard & Champoux, 1992; Lafarge, 1993; Pride & Berryman, 2003; Tournat, Pagneux, Lafarge, & Jaouen, 2004) permettent de mieux comprendre les phénomènes physiques d’interaction au sein d’un matériau poreux tout en y associant les paramètres descriptifs principaux de la microstructure.

1.7.1 Hypothèses générales

Le milieu poreux doit posséder une porosité majoritairement ouverte, soit des pores interconnectés pour assurer la propagation de l'onde au sein de la phase fluide. Les pores sont de taille suffisante pour considérer qu'à l'échelle microscopique chacune des deux phases (solides et fluide) constituant le milieu poreux puissent être assimilés à des milieux continus (Coussy, 1991). Le fluide saturant doit être peu visqueux pour éviter l'apparition d'un cisaillement à l'intérieur d'un pore. Les longueurs d'onde considérées doivent être grandes devant la taille de pores pour négliger les gradients de diffusion et pouvoir réaliser une moyenne spatiale locale ce qui équivaut à considérer un fluide incompressible à l'échelle des pores. Cette dernière hypothèse n'interdit cependant pas la variation de densité de la phase fluide. Dans le cas de l'acoustique audible par l'être humain, ces hypothèses sont remplies pour des pores allant de quelques micromètres à quelques centimètres.

La dispersion dans la microstructure des mousses stochastiques par leurs procédés d'obtention rend la description microscopique du réseau délicate et un volume d'homogénéisation est nécessaire pour pouvoir définir de manière statistique la microstructure du matériau. Il s'agit du plus petit volume de matériau dans lequel la moyenne des paramètres définis à l'échelle microscopique est constante. Cette méthode permet l'obtention d'un Volume Élémentaire Représentatif (VER) qui permet la description homogène du milieu.

L'élasticité associée au VER est supposée linéaire par l'hypothèse des petits déplacements (relations contraintes-déformations linéaires).

Enfin, les variations acoustiques de pression et de vitesse particulières peuvent être décrites par un régime harmonique du type $a(t) = \text{Re}(a \cdot e^{j\omega t})$.

1.7.2 Paramètres acoustiques

Une fois le VER d'un milieu poreux déterminé, la microstructure peut être caractérisée. Pour cela cinq **paramètres principaux** sont généralement employés :

- 1) La porosité du milieu : ϕ

Elle correspond à la porosité fluide ouverte. C'est le rapport du volume occupé par la phase fluide V_f sur le volume total du matériau V_t . Ce paramètre varie donc entre 0 et 1 et prend plus généralement des valeurs élevées pour les matériaux poreux acoustiques.

$$\phi = \frac{V_f}{V_t} \quad (1-1)$$

2) La résistivité statique au passage de l'air : σ

Si le matériau est soumis à une différence de pression statique, un écoulement quasi-statique est créé. La résistivité est le rapport du gradient de pression à travers l'échantillon et la vitesse de l'écoulement moyen. Ainsi pour un écoulement laminaire de débit volumique constant noté Q_v (m^3/s), la résistivité (en $N.s.m^{-1}$) est donnée par :

$$\sigma = \frac{\Delta p S}{Q_v e} \quad (1-2)$$

avec Δp (en $kg.m^{-1}.s^{-2}$) représente la diminution de pression au travers du matériau, S la section et e l'épaisseur de l'échantillon testé. La résistivité statique est liée à la perméabilité visqueuse statique k_0 par $\sigma = \eta/k_0$ avec η la viscosité dynamique du fluide.

3) La limite haute fréquence de la tortuosité : α_∞

La tortuosité d'un matériau poreux traduit le fait que l'onde se propage au sein d'une des phases du matériau en suivant un trajet sinueux pour contourner l'autre phase. La tortuosité est un paramètre purement géométrique, sans dimension, supérieur ou égal à 1 ($\alpha_\infty = 1$ dans le cas d'un milieu à pores cylindriques parallèles à la direction de propagation de l'onde acoustique). Ce paramètre peut être défini grâce au champ des vitesses particulières (Johnson, 1987) dans le milieu poreux par :

$$\alpha_\infty = \frac{\langle \vec{u}^2 \rangle}{\langle \vec{u} \rangle^2} \quad (1-3)$$

4) La longueur caractéristique visqueuse : Λ

Cette grandeur caractéristique exprimée en mètres est liée à la taille des interconnexions entre les pores. Il permet également une évaluation grossière des effets visqueux agissant aux hautes fréquences dans le milieu poreux. Il est défini de manière mathématique par :

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_{S_{int}} u^2 dS_{int}}{\int_{V_f} u^2 dV_f} \quad (1-4)$$

où S_{int} est la surface d'échange entre les deux phases du milieu poreux.

5) La longueur caractéristique thermique : Λ'

Par analogie avec la longueur caractéristique visqueuse, cet équivalent thermique est un indicateur de la taille des pores où siègent la majorité des échanges thermiques défini par :

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{\int_{S_{int}} dS_{int}}{\int_{V_f} dV_f} \quad (1-5)$$

1.7.3 Théorie de Biot

Biot a proposé entre 1941 et 1956 des modèles pour les matériaux poreux à squelette élastique dont les pores sont interconnectés et les longueurs d'onde suffisamment grande devant la taille caractéristique des hétérogénéités. Ces travaux basés sur l'expression de l'énergie potentielle élastique du poreux s'appliquent aux matériaux isotropes (Biot, 1941) et anisotropes (Biot, 1956) et servent avant tout à la prédiction au cours du temps des contraintes et déformations dans un matériau solide poreux dans lequel un fluide s'infiltre.

Biot a, par la suite, développé la théorie de la propagation des ondes élastiques dans un poreux solide saturé de fluide. Il en a établi la formulation (u, U) symétrique basée sur u le déplacement du solide et U le déplacement du fluide. Il a ensuite modifié sa formulation en 1962 en (u, w) pour rendre compte du déplacement relatif du fluide par rapport au solide.

Cependant, la résolution des équations de Biot par les méthodes numériques classiques nécessitent un temps de calcul important lié au grand nombre de degrés de liberté. Ainsi, Atalla en 1998 propose une nouvelle formulation dite mixte (u, p) basée sur le déplacement de la phase solide et la pression au sein du fluide.

La théorie acoustique de Biot de 1956 constitue la base de tous les modèles acoustiques regroupés dans la section suivante.

1.7.4 Équation d'onde de la pression acoustique à l'intérieure d'un tube de section circulaire :

Dans les conditions de la théorie de Biot, il a été montré que le milieu poreux pouvait être modélisé sous la forme d'un fluide équivalent de masse volumique et module de compressibilité reliés par :

$$\Delta p + \omega^2 \frac{\tilde{\rho}_{eq}}{\tilde{K}_{eq}} p = 0 \quad (1-6)$$

avec $\tilde{\rho}_{eq}$: la masse volumique équivalente et \tilde{K}_{eq} : le module de compressibilité équivalent.

Cette équation analogue à l'équation de Helmholtz, est normalement utilisée pour décrire la propagation du son dans l'air sans phénomène de dissipation. En revanche les valeurs de $\tilde{\rho}_{eq}$ et \tilde{K}_{eq} sont des nombres complexes dans le cas de propagation dans des milieux poreux et sont dépendant de la fréquence et de la forme des pores. C'est grâce à l'intervention des valeurs complexes que l'on simule la dissipation énergétique ayant lieu au sein du milieu poreux.

1.7.5 Complexification des modèles de propagation acoustique dans les milieux poreux au cours du temps

La description faisant appel à un fluide équivalent est très utilisée car elle facilite les simulations et la compréhension des matériaux poreux. Néanmoins, il est nécessaire d'extraire les bonnes informations de la microstructure afin de décrire correctement le milieu et en déduire sa masse volumique et le module de compressibilité équivalent. Des travaux portant sur la précision des méthodes utilisés pour la caractérisation de la microstructure (Salissou, 2009) ont également amené des modèles de plus en plus complets prenant en compte des paramètres supplémentaires, tels que la perméabilité thermique statique k'_0 ou encore la tortuosité thermique statique α'_0 comme le montre la Figure 1-27.

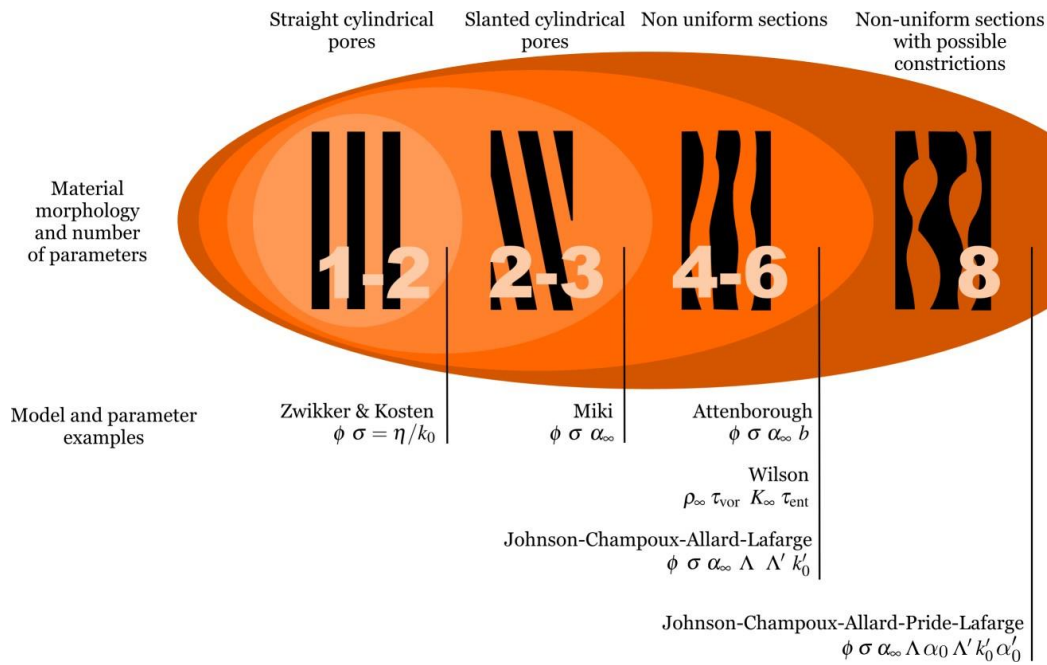


Figure 1-27 : Complexification des modèles semi-phénoménologiques en fonction de la forme des pores (L. Jaouen et F.X. Bécot, <http://apmr.matelys.com/>)

1.7.6 Modèle de Delany et Bazley :

Le premier modèle de comportement acoustique a été créé par Delany & Bazley pour rendre compte du comportement des matériaux fibreux les plus utilisés notamment dans le bâtiment pour l'isolation phonique. Ce modèle est valable pour une large bande de fréquence et pour un grand nombre de milieux fibreux dont la porosité est proche de 1. Il permet de décrire le comportement absorbant acoustique de milieux poreux en fonction de la fréquence f (Hz) au travers de leur impédance de surface équivalente Z_{fluide} et le nombre d'onde ramenée à la structure poreuse k . On a alors :

$$Z_{fluide} = \rho_0 c_0 \left[1 + 9,08 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,75} - j 11,9 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,73} \right], \quad (1-7)$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 10,08 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,70} - j 10,3 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,59} \right] \quad (1-8)$$

Domaine de validité :

$$0,01 < \frac{f}{\sigma} < 1,00 \quad (1-9)$$

1.7.7 Modèle de Miki :

Dans le cas de multi-couches, Miki (Miki, 1990) a constaté que la partie réelle de l'impédance devient négative pour des fréquences faibles marquant un non-sens physique. Il propose donc la formulation suivante pour palier à cette incohérence :

$$Z_{fluide} = \rho_0 c_0 \left[1 + 5,50 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} - j 8,43 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} \right], \quad (1-10)$$

$$k = \frac{\omega}{c_0} \left[1 + 7,81 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,618} - j 11,41 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,618} \right] \quad (1-11)$$

Domaine de validité :

$$0,01 < \frac{f}{\sigma} < 1,00 \quad (1-12)$$

Miki n'a pas souhaité élargir ces limites de validité bien que ces expressions ajustées se comportent bien sur une plus large bande de fréquence, c'est en particulier le cas pour $0,01 < \frac{f}{\sigma}$.

1.7.8 Modèle de Johnson-Champoux-Allard (JCA):

Ce modèle a pour ambition de décrire les phénomènes de dissipation visco-inertiel par une formulation de dissipation thermique au sein d'un milieu poreux. Ils proposent ainsi en 1987 ces relations semi-phénoménologiques pour décrire la densité et le module de compressibilité, tous deux complexes (pour introduire des dissipations), d'un matériau poreux ayant des formes de pores arbitraires et soumis à un champ acoustique.

$$\widetilde{\rho}_{eq} = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + j \omega \frac{4 \alpha_\infty^2 \eta \rho_0}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right], \quad (1-13)$$

$$\widetilde{K}_{eq} = \frac{\gamma P_0}{\phi} \frac{1}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{8 \kappa}{\Lambda'^2 C_p \rho_0 \omega} \sqrt{1 + j \omega \frac{\Lambda'^2 C_p \rho_0}{16 \kappa}} \right]^{-1}} \quad (1-14)$$

Ce modèle possède 4 paramètres : la porosité ouverte ϕ , la résistivité statique au passage de l'air du milieu σ , la limite haute fréquence de la tortuosité α_∞ et enfin la longueur caractéristique visqueuse Λ .

Ce modèle a par la suite été affiné pour une meilleur prévision des effets thermique en basses fréquences dans l'expression de \tilde{K}_{eq} au sein du modèle JCAL.

1.7.9 Modèle de Johnson-Champoux-Allard-Lafarge (JCAL):

Lafarge a modifié la formulation de la compressibilité après avoir observé une divergence avec les résultats expérimentaux en basse fréquences. Pour y pallier, il met en place un nouveau paramètre : la perméabilité thermique statique noté k'_0 pour décrire le comportement basse fréquence des échanges thermique dans le milieu poreux. Ainsi seule la compressibilité est modifiée, la formule pour la masse volumique restant la même :

$$\tilde{\rho}_{eq} = \frac{\alpha_\infty \rho_0}{\phi} \left[1 + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + j \omega \frac{4 \alpha_\infty^2 \eta \rho_0}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right], \quad (1-15)$$

$$\tilde{K}_{eq} = \frac{\gamma P_0}{\phi} \frac{1}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{\phi \kappa}{k'_0 C_p \rho_0 \omega} \sqrt{1 + j \omega \frac{4 k'^2_0 C_p \rho_0}{\kappa \Lambda'^2 \phi^2}} \right]^{-1}} \quad (1-16)$$

1.7.10 Modèle de Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge (JCAPL) :

En 1993, les travaux de Pride permettent d'affiner les prédictions acoustiques du modèle JCAL. Pour prendre en compte les fortes restrictions de sections entre les pores, il décide donc d'introduire un paramètre supplémentaire : la tortuosité thermique statique α'_0 .

C'est le modèle le plus complet à l'heure actuelle, son principal inconvénient est qu'il nécessite de déterminer 8 paramètres du milieu poreux pour obtenir une bonne prédiction de son comportement acoustique en basse comme en haute fréquence. La complexification du modèle permet de prendre en compte les interactions visqueuses et thermiques au sein du matériau poreux (équations

regroupées au Tableau 1-3. Les méthodes permettant de déterminer de manière fiable ces 8 paramètres sans une plage d'incertitude trop importante sont en cours de développement.

Tableau 1-3 : Équations de modèle JCAPL

Équations portant sur les phénomènes visqueux	Équations portant sur les phénomènes thermiques
$\widetilde{\rho_{eq}} = \rho_0 \widetilde{\alpha}(\omega)$ (1-17)	$\widetilde{K_{eq}} = \frac{\gamma P_0}{\phi} \frac{1}{\widetilde{\beta}(\omega)}$ (1-18)
$\widetilde{\alpha}(\omega) = \alpha_\infty \left[1 + \frac{1}{j\omega} \widetilde{F}(\omega) \right]$ (1-19)	$\widetilde{\beta}(\omega) = \gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{\widetilde{F}'(\omega)}{j\omega_r'} \right]^{-1}$ (1-20)
$\widetilde{F}(\omega) = 1 - P + P \sqrt{1 + j\omega_r \frac{M}{2P^2}}$ (1-21)	$\widetilde{F}(\omega) = 1 - P' + P' \sqrt{1 + j\omega_r' \frac{M'}{2P'^2}}$ (1-22)
$\omega_r = \frac{\omega \rho_0 k_0 \alpha_\infty}{\eta \phi}$ (1-23)	$\omega_r' = \frac{\omega \rho_0 C_p k_0'}{\kappa \phi}$ (1-24)
$M = \frac{8k_0 \alpha_\infty}{\phi \Lambda^2}$ (1-25)	$M' = \frac{8k_0'}{\phi \Lambda'^2}$ (1-26)
$P = \frac{M}{4 \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_\infty} - 1 \right)}$ (1-27)	$P' = \frac{M'}{4(\alpha_0' - 1)}$ (1-28)

Un autre avantage de la formulation proposée par Pride est qu'il permet facilement de se ramener à un modèle JCAL ou JCA dans le cas où l'on ne disposerait pas de tous les paramètres de notre milieu. Dans ce cas, il suffit d'appliquer $M' = P = P' = 1$ pour le modèle JCA et $P = P' = 1$ pour le JCAL.

1.8 Propagation acoustique au sein de structures microcanaux

L'étude de la propagation des ondes acoustiques au sein de structures régulières comme des canaux a fait l'objet de nombreux travaux de modélisation, aussi bien numériques qu'analytiques.

Il est souvent relié à l'étude de la réponse dynamique en pression dans les lignes de transmission formé par un réseau de canaux.

Les solutions analytiques présentées dans la littérature découlent soit de la résolution du problème de Kirchhoff avec simplifications analytiques et sont données sous la forme de fonction transcendante, où sont dérivées des équations standards de Navier-Stokes avec introduction d'hypothèses simplificatrices. Les travaux de Tijdeman (Tijdeman, 1975) ont permis de montrer que la solution trouvée par Zwikker&Kosten (Kosten & Zwikker, 1949) dite « solution en fréquence réduite basse » (*low reduced frequency solution*) permet de couvrir la majorité des modèles proposés par d'autres auteurs tels que celles de Helmholtz, Kirchhoff wide tube, Rayleigh, Kerris ou encore de Weston (Rott, 1969) comme illustré à la Figure 1-28.

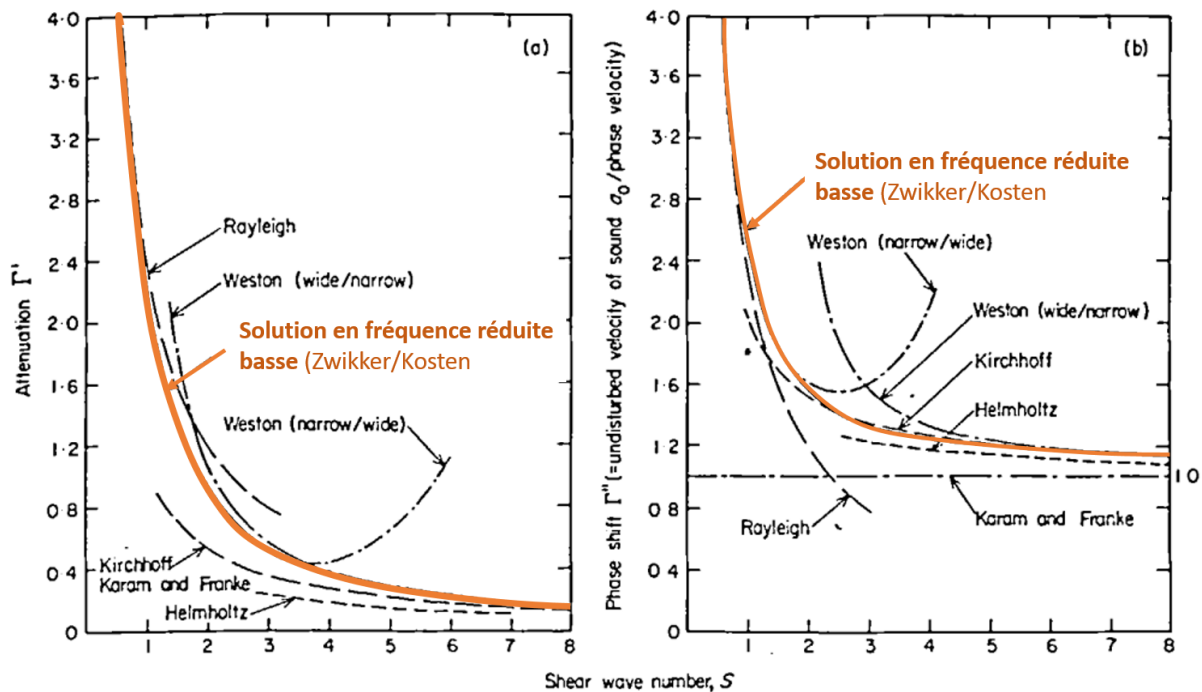


Figure 1-28 : Modèles de propagation d'onde sonore dans tube étroit

Atténuation Γ' et changement de phase Γ'' en fonction du nombre d'onde en cisaillement

Tijdeman en s'appuyant sur la solution de Zwikker-Kosten (Kosten & Zwikker, 1949) montre que le problème de petites fluctuations sinusoïdales dans une colonne fluide de forme cylindrique est complètement déterminé selon 4 paramètres :

- Le nombre d'onde en cisaillement (ou nombre de Stokes) : $s = r_{tube} * \sqrt{\frac{\rho_{moy} \cdot \omega}{\mu}}$

- Fréquence réduite : $k = \frac{\omega * r_{tube}}{a_0}$
- Racine carrée du nombre de Prandtl : $\zeta = \sqrt{\frac{\mu * C_p}{\kappa}} = \sqrt{Pr}$
- Ratio des chaleurs spécifiques : $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

1.8.1 Formulation du problème :

Les équations de Navier –Stokes permettent de décrire le mouvement d'une colonne fluide dans un tube cylindrique circulaire (dans la direction axiale et radiale), soit l'équation de continuité, du bilan de la quantité de mouvement, du bilan de l'énergie, donnant l'équilibre entre l'énergie thermique et cinétique du système (Tijdeman, 1975).

Grâce à ce système d'équations on peut obtenir les grandeurs pertinentes suivantes : la vitesse particulaire axiale et radiale, la densité, la température et la pression.

Une fois simplifiée dans le cadre de notre problème, on obtient :

$$ju = -\frac{1}{\gamma} * \frac{\partial p}{\partial \xi} + \frac{1}{s^2} \left[\left(k^2 * \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial \varsigma^2} + \frac{\partial u}{\partial \varsigma} \right) + \frac{1}{3} * k \frac{\partial}{\partial \xi} \left(k \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \varsigma} + \frac{v}{\varsigma} \right) \right] \quad (1-29)$$

$$jkv = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial \varsigma} + \frac{k}{s^2} \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial \varsigma^2} + \frac{1}{\varsigma} \frac{\partial v}{\partial \varsigma} - \frac{v}{\varsigma^2} + k^2 \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial \varsigma} \left(k \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \varsigma} + \frac{v}{\varsigma} \right) \right] \quad (1-30)$$

$$jk\rho = -\left(k \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \varsigma} + \frac{v}{\varsigma} \right) \quad (1-31)$$

$$p = \rho + T \quad (1-32)$$

$$jT = j \frac{\gamma - 1}{\gamma} p + \frac{1}{\sigma^2 s^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \varsigma^2} + \frac{1}{\varsigma} \frac{\partial T}{\partial \varsigma} + k^2 \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} \right) \quad (1-33)$$

ς et ξ étant les coordonnées adimensionnelles spatiales dans le tube. $\xi = \frac{\omega x}{a_0}$;

$$\varsigma = \frac{r}{R}.$$

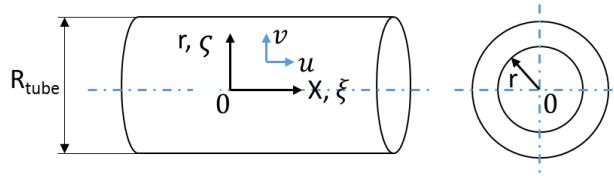


Figure 1-29 - Coordonnées dans le tube

Les hypothèses associées à ce problème sont les suivantes :

- Le milieu fluide est homogène, ce qui implique que la longueur d'onde et le rayon du tube doivent être grands devant la distance de libre parcours moyen, ce qui donne pour les conditions atmosphériques de l'air à pression et température au sol,

$$0 < f < 10^8 \text{ Hz et } r_{\text{tube}} > 10^{-7} \text{ m.} \quad (1-34)$$

- Pas de flux constant (ou flot continu)
- Petites amplitudes, perturbations sinusoïdales (pas de circulation et pas de turbulence)
- Les tubes sont suffisamment longs, que les effets de terminaison sont négligés

Les conditions aux limites et hypothèses nécessaires pour la résolution du problème sont :

- À la surface du mur rigide, la vitesse particulière axiale et radiale doit être nulle, i.e :

$$\text{à } \zeta = 1, \quad u = 0 \text{ et } v = 0; \quad (1-35)$$

- La vitesse radiale doit être nulle le long de l'axe du cylindre car le problème est axisymétrique :

$$\text{à } \zeta = 0, v = 0 \text{ et } u, p, \rho \text{ et } T \text{ ont des valeurs finies;} \quad (1-36)$$

- La conductivité thermique des murs du tube est grande vis-à-vis de la conductivité du fluide :

$$\text{à } \zeta = 1, T = 0 \text{ (murs isothermes).} \quad (1-37)$$

1.8.2 Résolution du problème

Si on suppose que la solution selon la pression peut être écrite sous la forme :

$$p = [A\{\zeta\}.e^{\Gamma\xi} + B\{\zeta\}.e^{-\Gamma\xi}]e^{-j\omega t} \quad (1-38)$$

La solution pour la constante de propagation Γ , est alors :

$$\Gamma = \sqrt{\frac{J_0\left(j^{\frac{3}{2}} * s\right)}{J_2\left(j^{\frac{3}{2}} * s\right)}} * \sqrt{\frac{\gamma}{n}} \quad (1-39)$$

$$\text{Avec,} \quad n = \left[1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{J_2\left(j^{\frac{3}{2}} * \zeta s\right)}{J_0\left(j^{\frac{3}{2}} * \zeta s\right)}\right]^{-1} \quad (1-40)$$

Le module polytropique obtenu varie non linéairement en fonction du nombre d'onde en cisaillement comme montré à la Figure 1-30.

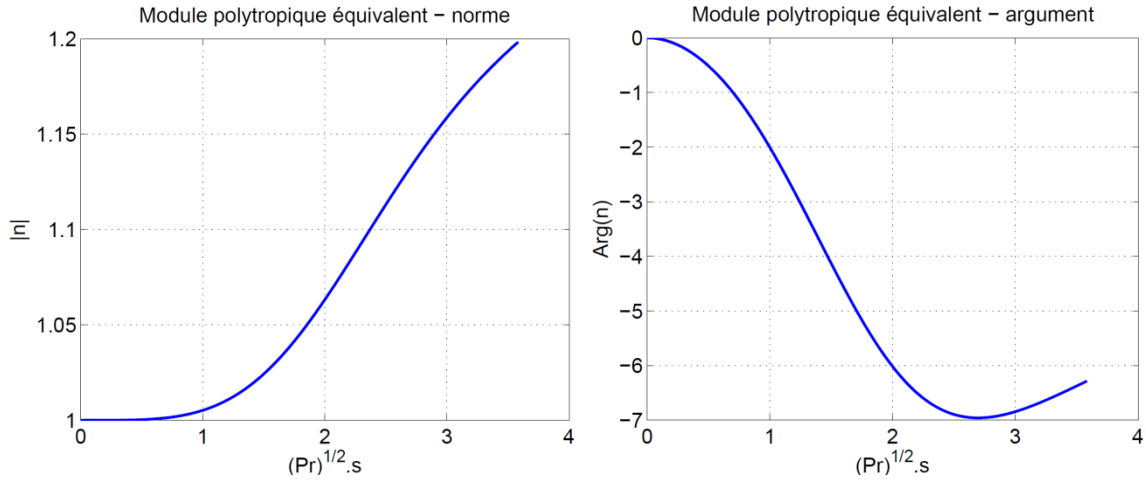


Figure 1-30 : Module polytropique

Une fois l'atténuation présente dans les tubes modélisée, le fluide équivalent dissipatif correspondant à notre phénomène dans un cylindre circulaire peut être calculer (Stinson, 1991):

$$\widetilde{\rho_{eq}} = \frac{\rho_0}{\phi} \cdot \left[1 - \frac{2}{s\sqrt{-j}} \frac{J_1(s\sqrt{-j})}{J_0(s\sqrt{-j})}\right]^{-1} \quad (1-41)$$

$$\widetilde{K}_{eq} = \frac{P_0}{\phi} \cdot \gamma \left[1 + (\gamma - 1) \frac{2}{\sigma s \sqrt{-j}} \frac{J_1(\zeta s \sqrt{-j})}{J_0(\zeta s \sqrt{-j})} \right]^{-1} \quad (1-42)$$

L'évolution de module de compressibilité K_{eq} et de la masse volumique ρ_{eq} en fonction de la fréquence et leur décomposition en partie réelle et imaginaire (partie dissipative) sont illustrés à la Figure 1-31.

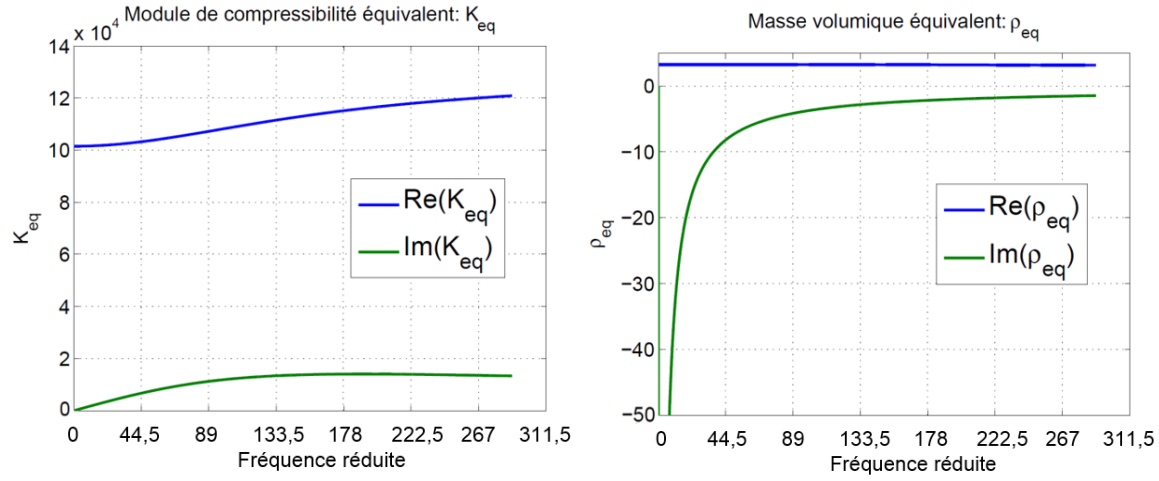


Figure 1-31 : Caractéristiques du fluide équivalent

Enfin, il est possible d'obtenir l'impédance de surface équivalente du matériau constitué de microcanaux, en considérant que ce fluide équivalent est adossé à une plaque rigide :

$$Z_{fluide} = \sqrt{\widetilde{K}_{eq} \cdot \widetilde{\rho}_{eq}} \quad (1-43)$$

$$Z_{liner} = Z_{fluide} \cdot \coth \left(j \cdot \omega \cdot e_{liner} \cdot \sqrt{\frac{\widetilde{\rho}_{eq}}{\widetilde{K}_{eq}}} \right) \quad (1-44)$$

On considérera tout au long de l'étude un traitement acoustique d'épaisseur spécifique noté $e_{spéc}$.

Puis, les coefficients de réflexion et d'absorption associés s'obtiennent par :

$$R = \frac{Z_{liner} - \rho_0 c_0}{Z_{liner} + \rho_0 c_0} \quad (1-45)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (1-46)$$

On définit une longueur d'onde spécifique haute fréquence $\lambda_{spéc}$ pour laquelle l'absorption acoustique des microcanaux est égale à 1.

À titre d'exemple, les résultats pour $r_{tube} = \frac{1}{500} \lambda_{spéc}$, $\phi = 0.5$ et $e_{liner} = \frac{1}{2} e_{spéc}$ sont montrés aux Figure 1-32 .

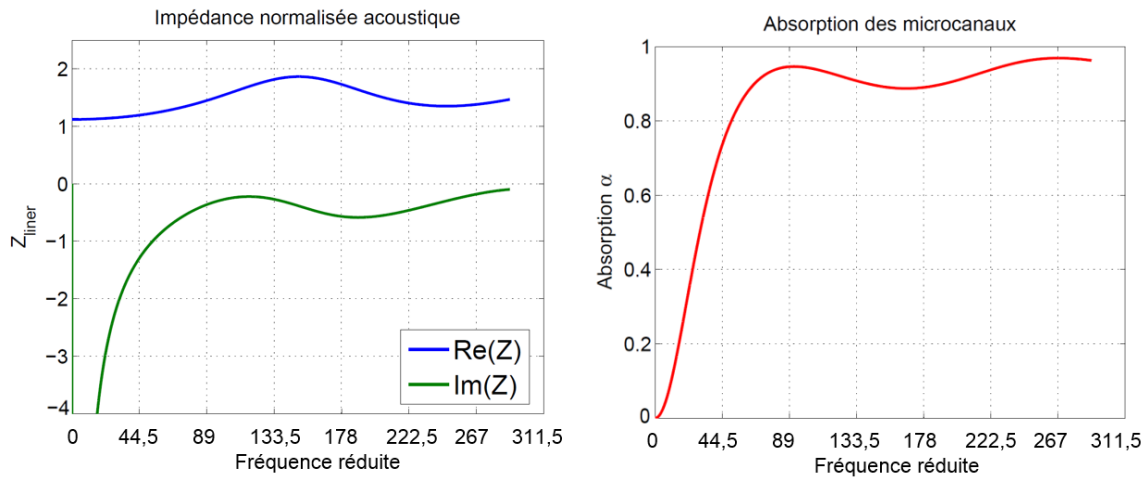


Figure 1-32 : Impédance acoustique normalisée et absorption du traitement par microcanaux

L'impédance d'un matériau constitué de microcanaux montre qu'une absorption sur une large bande de fréquence est possible. Ce type de réseau de propagation possède donc un spectre d'atténuation semblable aux structures poreuses stochastiques.

1.9 Modèle acoustique de propagation au sein de structures filamenteuses ordonnées (Modèle AML : *Additive Micro Lattice*)

Le modèle présenté ci-après permet de déterminer les propriétés d'impédance et d'absorption de structures filamenteuses ordonnées.

Il s'appuie sur les travaux de modélisation du comportement acoustique au sein de cristaux soniques menés par Guild (Guild, Garcia-Chocano, Kan, & Sánchez-Dehesa, 2014) et modifié pour

les besoins spécifiques des structures produites durant ce projet. Le modèle proposé par Guild découle des équations proposées par Allard (J. Allard & Champoux, 1992) et destinées à prédire les interactions d'une onde acoustique avec un réseau fibreux. Ce modèle comme les modèles de la famille JCA est valable de 50 Hz (limite de l'hypothèse adiabatique au sein du poreux sans paramètres spécifiques en basse fréquence) et jusqu'à 100 kHz pour les dimensions caractéristiques considérées.

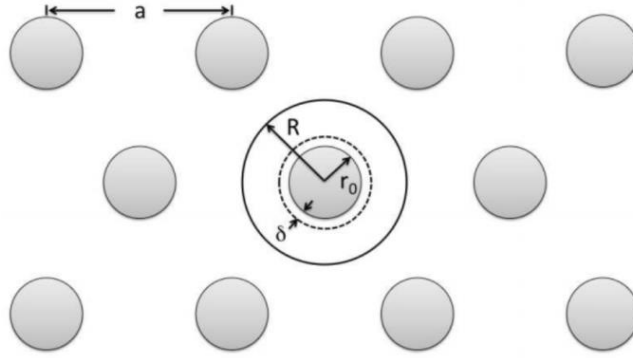


Figure 1-33: Schéma descriptif d'un cristal sonore

Ainsi, pour un réseau de fibres rigides l'expression de la masse volumique apparente devient

$$\rho_{app} = \rho_0 \frac{2 - \phi}{\phi} \left(1 - j \frac{\tilde{F}}{\tilde{\omega}_s} \right), \quad (1-47)$$

où ρ_0 est la masse volumique de l'air, ϕ le taux de porosité. La fonction de dissipation \tilde{F} et la fréquence angulaire réduite $\tilde{\omega}_s$ sont telles que :

$$\tilde{F} = \sqrt{1 + \frac{jM\tilde{\omega}_s}{2}}, \quad (1-48)$$

$$\tilde{\omega}_s = \frac{1}{2(1 - \phi) \left(\frac{\delta}{r_0} \right)^2} \cdot \frac{2 - \phi}{\phi} \cdot \left[-\frac{1}{2} \ln(1 - \phi) + \frac{1}{4} - \phi - \frac{(1 - \phi)^2}{4} \right] \quad (1-49)$$

$$M = \frac{8(1 - \phi)}{(2 - \phi)^2} \cdot \frac{2 - \phi}{\phi} \cdot \left[-\frac{1}{2} \ln(1 - \phi) + \frac{1}{4} - \phi - \frac{(1 - \phi)^2}{4} \right] \quad (1-50)$$

avec δ l'épaisseur de la couche limite visqueuse autour de chaque fibre donné par :

$$\delta = (1 - j) \frac{\sqrt{Pr}}{k_t} \quad (1-51)$$

Où Pr est le nombre de Prandtl et k_t le nombre d'onde thermique :

$$Pr = \frac{\eta C_p}{\kappa}, \quad (1-52)$$

$$k_t = (1 - j) \sqrt{\frac{\omega \rho_0 Pr}{2\eta}} \quad (1-53)$$

La couche limite thermique équivalente est obtenue de manière similaire par:

$$\delta' = \frac{\delta}{\sqrt{Pr}} \quad (1-54)$$

Les paramètres du micro-treillis sont ensuite traduits dans la description des réseaux poreux formulée par Allard pour rapporter les longueurs caractéristiques visqueuse et thermique (J. Allard & Champoux, 1992),

$$\Lambda = \frac{r_0}{2} \frac{\phi(\phi - 2)}{1 - \phi}, \quad (1-55)$$

$$\Lambda' = r_0 \frac{\phi}{1 - \phi}. \quad (1-56)$$

De même, l'expression explicite de la résistivité au passage de l'air pour un arrangement de fibres orthogonales périodiques (d'après Tarnow, 1996) :

$$\sigma = \frac{4\eta(1 - \phi)}{r_0^2 \left[-\frac{1}{2} \ln(1 - \phi) + \frac{1}{4} - \phi - \frac{(1 - \phi)^2}{4} \right]}. \quad (1-57)$$

Finalement, le réseau poreux est décrit par les propriétés d'un fluide équivalent (masse volumique apparente et module de compressibilité équivalent) dissipatif des ondes qui le traverse :

$$\widetilde{\rho}_{eq} = \rho_0 \frac{2 - \phi}{\phi} \left(1 - j \frac{\tilde{F}}{\tilde{\omega}_s} \right), \quad (1-58)$$

$$\widetilde{K}_{eq} = \frac{(\gamma - 1) P_0}{\phi} \left[1 + \frac{(\gamma - 1)\delta}{(1 - j)\Lambda'} \right]. \quad (1-59)$$

Grâce aux équations décrites ci-dessus, le comportement acoustique d'un réseau filamentaire ordonné peut donc être modélisé. De la même manière que pour le réseau de microcanaux, on se ramène aux propriétés d'un fluide équivalent dissipatif dans lequel l'onde vient se propager.

Ce chapitre a permis de montrer les modèles présents de la littérature pouvant être investigués dans le cadre de la création de structures acoustiques. Ces modèles génériques devront être adaptés pour tenir compte des spécificités dimensionnelles des réseaux étudiés.

CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Les traitements acoustiques équipant à l'heure actuelle les moteurs d'avions sont constitués de panneaux sandwichs métalliques ou composites. Ces traitements fonctionnant sur le principe des résonateurs de Helmholtz possèdent une réaction localisée et ont fait l'objet de travaux d'optimisation ces 20 dernières années. Ce type de traitement montre des limitations et face à l'augmentation des contraintes de conception; il est souhaitable de trouver d'autres moyens d'absorption de l'onde acoustique susceptible de répondre aux futures architectures moteur qui seront réalisées et qui devront passer par une certification de plus en plus stricte pour limiter encore d'avantage l'impact du transport aérien.

Dans ce contexte, les matériaux poreux semblent offrir des perspectives susceptibles d'apporter un gain en performance acoustique. Néanmoins ceux-ci n'ont pu jusqu'alors satisfaire l'ensemble des contraintes aéronautiques présentes sur les turboréacteurs pour pouvoir y être implantés. L'objectif de ce mémoire est d'évaluer les possibilités offertes par la fabrication additive et les matériaux poreux commerciaux.

Plusieurs défis doivent être relevés pour parvenir à l'objectif. Premièrement, la modélisation du comportement acoustique des matériaux poreux est un champ d'étude vaste car les microstructures peuvent être très différentes (fibreuse, cellulaires, périodiques ou non etc...) et ne répondent donc pas au même type de modélisation pour prédire leur comportement acoustique. Deuxièmement, ce matériau acoustique poreux est destiné à être inséré dans une zone moteur remplissant déjà de nombreuses fonctions. La fabrication additive est envisagée pour réaliser une partie ou la totalité du traitement. Elle regroupe une grande variété de procédés dont certains sont encore en développement et améliorent sans cesse leurs capacités, rendant l'évaluation compliquée. Enfin il existe encore peu de publications scientifiques liant les moyens de fabrication additive de matériaux poreux et leurs produits au domaine de l'acoustique.

Par conséquent les objectifs dans cette étude sont :

1. Établir une sélection des procédés de fabrication additive susceptible de générer des microstructures acoustiques intégrables et évaluer leurs potentiels et limitations
2. Proposer un modèle capable de prédire le comportement acoustique de milieu poreux
3. Lier les paramètres du procédé de fabrication additive à la microstructure et ultimement au comportement acoustique
4. Caractériser le comportement mécanique des microstructures.

La sélection des procédés de fabrication additive permet une orientation stratégique des procédés préconisés pour l'obtention de structures acoustiques. On montre la pertinence des procédés de micro fabrication disponibles au sein du laboratoire LM2². À partir du procédé d'impression sélectionné, les paramètres d'impression sont extraits et introduits dans des modèles programmés sous Matlab pour prédire le comportement acoustique de structures réalisées. On vérifie la capacité de procédés de micro-fabrication additive pour générer des structures périodiques poreuses ordonnées. Finalement, des essais expérimentaux mécaniques et acoustiques permettent d'évaluer la pertinence des microstructures acoustiques créés.

² Laboratoire de Mécanique Multi-échelles de l'École Polytechnique de Montréal, spécialisé en microfabrication

CHAPITRE 3 SÉLECTION DE PROCÉDÉS DE FABRICATION ADDITIVE

Les matériaux poreux possèdent donc des qualités intéressantes pour l'atténuation des ondes sonores. Néanmoins, les produits de traitement acoustiques actuellement commercialisés sur le marché ne semblent pas répondre de manière complètement satisfaisante à notre problématique. À ce titre, les technologies de fabrication additive (ou *Additive Manufacturing*) représentent aujourd'hui une alternative intéressante pour générer de nouveaux matériaux dédiés à une application spécifique.

Pour notre cas d'application, les technologies de fabrication additives sont employées pour générer des structures poreuses (semblables à des mousses) permettant d'absorber les ondes sonores.

3.1 Introduction à la fabrication additive

Les techniques de fabrication conventionnelles sont basées sur une succession d'opérations. On part généralement d'un brut auquel on soustrait de la matière au fur et à mesure des étapes de réalisation, c'est la **fabrication soustractive**. La **fabrication additive** vient en opposition de ce concept en permettant la réalisation de pièces totalement fonctionnelles en une unique opération et sans perte de matière première (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010). L'attrait de cette technologie vient de la totale liberté de conception qu'elle offre aux concepteurs, permettant les géométries les plus poussées et complexes (Bourell, Beaman, Leu, & Rosen, 2009).

Au départ, le but de cette nouvelle technologie était de fabriquer rapidement des prototypes, d'où le premier nom générique associé de « Prototypage Rapide » (*Rapid Prototyping*). Puis, lorsque cette technologie s'est développée et diversifiée jusqu'à développer ou produire des outils, elle fut alors désignée par le terme d'Outillage Rapide (*Rapid Tooling*). Ces dernières années, sous

l'impulsion de nouveaux procédés avec matériaux métalliques, le terme de Rapid Manufacturing se développe car permet désormais de réaliser des pièces avec de bonnes propriétés structurales.

Au départ cantonnée à la création de prototypes, la fabrication additive a permis la fabrication d'outils (Jacobs, 1992) et s'attaque maintenant à la génération de pièce fonctionnelles notamment avec le développement des procédés métalliques aux propriétés mécaniques plus élevées (Atzeni & Salmi, 2012).

Finalement, cette technologie s'est tellement diversifiée au cours des 30 dernières années qu'elle est maintenant connue sous le nom de Fabrication Additive (*Additive Manufacturing*) car elle permet de réaliser des pièces, des outils ou encore des prototypes visuels et fonctionnels.

Cette technologie a donc rapidement évoluée et ses domaines d'applications se sont étendus : le médical, la sculpture, l'architecture, l'industrie, et bien d'autres encore (Murr et al., 2010). D'autres noms ont été donnés comme fabrication à forme libre, fabrication numérique, fabrication en couche, impression 3D, procédés additifs, techniques additives, fabrication par adhésion de couches etc. La raison principale de cette profusion de noms est que la technologie a sans cesse dépassée son utilisation initiale. Les technologies de fabrication additive ne sont pas seulement utilisées comme un procédé unique mais plutôt comme une partie de la chaîne d'un processus de production. Par exemple les pièces produites par stéréolithographie peuvent servir de premier moule pour un moulage à la cire perdue.

Les avancées des technologies AM ne sont pas seulement limitées à ces nouveaux procédés mais aussi aux nouveaux matériaux, les nouvelles machines et les nouvelles méthodes de finitions pouvant être mis en œuvre pour générer des pièces. Cette diversification des techniques et matériaux employables suscite aujourd'hui l'engouement de nombreux acteurs financiers et industriels à travers le monde (Wohlers, 2012).

3.2 Processus de conception et avantages associés à l'emploi des technologies AM

La fabrication additive consiste à créer des objets en agglomérant ou assemblant de multiples éléments de petites dimensions. La majeure partie des technologies utilisées aujourd'hui

procèdent par l'impression de fines couches de matériaux qui sont liées entre elles. On obtient ainsi un objet composé de multiples strates.



Figure 3-1 : Processus de création d'objet par fabrication additive

Étapes nécessaires à la production de pièces par fabrication additive (Figure 3-1)

- 1) Modéliser la pièce sur un outil de conception 3D par ordinateur (CATIA, SolidWorks, SketchUp etc.)
- 2) Générer le fichier STL traduisant le modèle sous forme de points et normales de surface
- 3) Importer la pièce dans un « logiciel découpeur » (*Slicer software*) approprié au procédé de fabrication additive utilisé par la suite
- 4) Lancer l'impression sur la machine dédiée (réglages des derniers paramètres de génération)
- 5) Récupérer les pièces et réaliser les opérations de finitions éventuelles.

Cette méthode de fabrication en opposition avec les techniques de fabrication traditionnelles, telles que l'usinage conventionnel, impliquent de nombreux changements :

- La **manière de concevoir** : les concepteurs doivent penser de manière radicalement différente à leurs conceptions. Le but n'est plus d'enlever de la matière pour alléger ou percer un brut de fonderie. Il faut mettre de la matière là où elle est nécessaire sans surplus. Cette démarche ouvre par exemple la voie à la conception par topologie.
- Les chaînes d'assemblage et d'approvisionnement réduites par la **diminution du nombre de pièces** imprimées ou assembler directement durant l'impression.
- Les **conceptions « open source »** peuvent être partagés et imprimés n'importe où dans le monde, entraînant la suppression du temps de transport.
- **Fabrication sur demande**, minimisation des coûts indirects de production (stocks)

- **Grande variabilité de pièces** produites avec un seul outil : personnalisation sans surcoût
- Relocalisation de la **production au plus près du client** (vente d'imprimante 3D personnelles pour les particuliers)

Plus précisément, lors de la conception d'une pièce destinée à être réalisée en impression 3D, on observe les avantages suivants :





- **La complexité est gratuite** : la fabrication additive permet l'obtention de forme complexe impossible à réaliser avec les procédés conventionnels. L'intégration de circuits de refroidissement devient possible ainsi que l'emploi des stratégies d'optimisation par définition topologique, bio mimétisme, algorithme génétique, ou encore construction multi échelles etc...
- **Fabrication directe à partir d'un modèle numérique** (ce qui vaut parfois l'appellation de *digital manufacturing* à la fabrication additive). L'emploi du type de fichier .STL s'est généralisé et des bases d'objets virtuels privées et publiques permettent d'accéder à une multitude de modèles. De plus les logiciels de CAO devenant de plus en plus performants et accessibles, il est désormais possible de réaliser facilement ses propres objets adaptés à ses besoins.
- **Production en temps masqué** : Une fois le processus d'impression lancé et correctement calibré, la machine de fabrication peut opérer seule sans surveillance humaine permettant de produire 24h/24h des pièces.
- **Intégration de fonctionnalités** lors de la génération de produits : on peut imaginer avec ces technologies additives l'ajout ponctuel de microsystèmes tels que des capteurs, des composants électroniques au sein d'une structure. Les fonctions techniques sont directement implantées dans la phase de fabrication.
- **Matériaux spécifiques** et à hautes propriétés intrinsèques : les déchets générés par la fabrication additive sont minimaux (pas de copeaux d'usinage) et les matériaux pouvant être utilisés sont très diversifiés.
- L'introduction de **nanoparticules** pour fonctionnaliser un composant.
- Un autre axe actuellement en développement est **l'association des multiples matériaux** dans une même génération, on peut ainsi contrôler localement divers propriétés de notre objet tels que : la couleur, la tenue mécanique, la conductivité, la densité, l'état de surface.

La fabrication additive offre donc une opportunité unique d'adapter une pièce selon des critères de conception multiples.

3.3 Familles de Procédés AM

La fabrication additive couvre une multitude de technologies et malgré la jeunesse de ces technologies, il est possible de classer les procédés commerciaux selon des grandes familles utilisant des phénomènes physiques communs ou possédants des caractéristiques communes.

Tableau 3-1 : Familles de procédés au sein de la fabrication additive

	<p>1/ Polymérisation par agent extérieur (<i>External Agent Polymerization</i>) :</p> <p>Utilisation de matériaux en solution qui, soumis à un agent extérieur, pour former un solide. On polymérise le matériau couche après couche.</p>
	<p>2/ Déposition par extrusion (<i>Extrusion Deposition</i>) :</p> <p>Un matériau thermoplastique est extrudé par une buse dont le déplacement est contrôlé par ordinateur. La buse chauffante fait fondre le matériau qui est ensuite déposé pour former une couche. Une fois la couche formée on vient abaisser le modèle pour déposer les couches successives jusqu'à formation de la pièce complète.</p>
	<p>3/Agrégation de particules (<i>Granular Materials Binding</i>) :</p> <p>Les particules de matière sont fondues partiellement ou totalement par un laser ou une buse chauffante. Une fois la couche de particules agrégée ou frittée, on vient placer de nouvelles particules pour générer la couche suivante et ainsi de suite. Les particules non agrégées servent de support à l'objet produit.</p>
	<p>4/ Objet par couches minces laminées (<i>SheetLamination</i>) :</p> <p>De fines feuilles de matière (de plastique ou métal) sont assemblées les unes aux autres pour former un objet. L'assemblage des feuilles peut se faire par fusion, collage tandis que la découpe de la forme des feuilles est opéré par une lame mécanique ou un laser. La matière inutile (extérieure à la découpe) est retirée puis on assemble les feuilles jusqu'à obtention de la pièce.</p>

Ces quatre familles permettent d'inclure l'essentiel des technologies de fabrication actuelles.

3.4 Technologies impliquées et procédés associés

Au sein de chacune des familles décrites, différentes technologies utilisent le même principe physique et possèdent des caractéristiques communes regroupées dans le Tableau 3-2.

Le code couleur des cellules permet de relier chaque technologie avec sa famille de procédé du Tableau 3-1.

Tableau 3-2 : Opportunités et limites des procédés commerciaux

Technologie	Matériaux typiques
Flashage lumineux haute intensité DLP : <i>Digital Light Processing</i>	Solutions photo-polymérisable
Stéréolithographie SLA : <i>Stereolithography Apparatus</i>	Solutions photo-polymérisable Composites
Déposition de fil fondu FDM : <i>Fused Deposition Modeling</i>	Thermoplastiques
Frittage métallique direct par laser DMLS : <i>Direct Metal Laser Sintering</i>	Acier inoxydable, chrome cobalt, alliages de nickel
Fusion par faisceau d'électron EBM : <i>Electron Beam Melting</i>	Poudre de titane, chrome cobalt
Frittage sélectif par laser SLS : <i>Selective Laser Sintering</i>	Papier, plastique, métal, verre, céramique, composites
Frittage plastique : Modelage par jet d'encre MM : <i>Model Maker</i> 3DP : <i>Three-dimensionnal Printing</i> Polyjet	Poudre de thermoplastiques
Addition de couches minces LOM : <i>Laminated Object Manufacturing</i>	Papier, plastique, feuilles de métal laminées, céramiques, composites

Une description détaillée des procédés mentionnés ci-dessus est consultable au sein de l'ouvrage : *Additive Manufacturing Technologies* (Gibson et al., 2010).

Les principales limitations des procédés commerciaux résident dans les matériaux employés. Pour un couple procédé/matériau, il est très facile de connaître les capacités réelles de chacun des procédés. Les principales nouveautés et avantages concurrentiels développés résident dans les matériaux imprimables. Les machines évoluent également mais les problématiques de précisions machines sont les mêmes que celles rencontrées sur les machines conventionnelles d'usinage. Pour chaque technologie, une sélection de matériau compatible donne une meilleure

idée des capacités mécaniques ou autres de pièces réalisées. Le Tableau 3-3 donne un aperçu des sélections de matériaux en fonction des technologies, toujours avec le même code couleur.

Tableau 3-3 : Matrice procédés / matériaux

Technologie	Polymères	Métaux	Céramiques	Composites
Flashage lumineux haute intensité DLP : <i>Digital Light Processing</i>	✓			
Stereolithographie SLA : <i>StereolithographyApparatus</i>	✓			✓
Déposition de fil fondu FDM : <i>FusedDepositionModeling</i>	✓			
Frittage métallique direct par laser DMLS : <i>Direct Metal Laser Sintering</i>		✓		
Fusion par faisceau d'électron EBM : <i>ElectronBeamMelting</i>		✓		
Frittage sélectif par laser SLS : <i>Selective Laser Sintering</i>	✓	✓	✓	✓
Frittage plastique : Modelage par jet d'encre MM : <i>Model Maker</i> 3DP : <i>Three-dimensionnal Printing</i> Polyjet	✓	✓		✓
Addition de couches minces LOM : <i>Laminated Object Manufacturing</i>	✓	✓	✓	✓

À la lecture de ce tableau, il est donc possible de mettre en forme par fabrication additive différent type de matériau mais sous certaines conditions bien précises, ce qui limite le spectre des applications industrielles où les contraintes de réalisation sont plus nombreuses et/ou plus précises que pour le grand public.

L'emploi des matériaux céramiques est principalement limité aux zones nécessitant une tenue aux hautes températures. Ces matériaux possédant une forte densité il est difficile de les incorporer à d'autres emplacements sans une augmentation de masse. Les thermoplastiques rencontrent souvent des problèmes de durabilité notamment face à l'environnement sévère rencontré sur les avions. Les procédés faisant appel aux matériaux métalliques ou aux composites sont intéressants car leurs produits possèdent souvent des caractéristiques mécaniques élevées comme requis pour des systèmes aéronautiques.

3.5 Procédés utilisés pour un but acoustique

Dans le cas de la production d'un matériau acoustique, seuls les procédés permettant l'obtention d'un milieu fortement poreux sont compatibles avec les objectifs fixés. Par ailleurs, la majorité des procédés commerciaux ne permettent pas pour l'instant d'atteindre les précisions d'impression voulues pour l'acoustique. C'est particulièrement le cas pour la fabrication additive métallique. Le bilan général de la sélection est donné dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Pertinence des familles de procédés de fabrication additive pour l'acoustique

Polymérisation par agent extérieur 	Technologie prometteuse <p>Par la variabilité des matériaux utilisables, ces technologies permettent des impressions avec des propriétés mécaniques, optiques, chimiques extrêmement diversifiées.</p> <p>Le principal défi est de trouver le bon tryptique : matériau + agent extérieur, précision d'impression, vitesse d'impression</p>
Déposition par extrusion 	Technologie prometteuse <p>C'est la technologie la plus structurée commercialement et employée actuellement, de nombreux chercheurs apportent leurs contributions pour améliorer les performances de ces systèmes d'impression. Les machines commerciales classiques ne permettent pas de descendre à l'échelle nécessaire pour notre application acoustique de génération de milieu poreux mais des systèmes modifiés peuvent être pertinents.</p>
Agrégation de particules 	Technologie à intérêt limité <p>Les pièces issues des procédés d'agrégation de particules sont denses et ne pourront pas atteindre de porosité importante nécessaire pour l'acoustique. Néanmoins on pourrait utiliser ces technologies pour imprimer notre réseau de porosités, imprégner les interstices entre les particules agrégées puis retirer ces particules pour récupérer au final le négatif de l'impression 3D.</p>
Objet par couches minces laminées 	Technologie non-adaptée <p>Précision insuffisante pour créer des structures avec suffisamment de détails pour bon comportement acoustique. Les pièces générées par ces procédés sont trop lourdes (masse volumique) pour être intéressantes pour un revêtement aéronautique.</p>

Les procédés des deux premières familles sont les plus aptes à l'heure actuelle de fournir des matériaux acoustiques performants. Sur la base de ces constatations, un accord a été passé avec le laboratoire de microfabrication additive du professeur Daniel Therriault pour utiliser ses équipements durant le projet. Les procédés novateurs qui y sont utilisés permettent de coupler les capacités des deux premières familles de technologies décrites dans la sélection. Ils sont donc particulièrement pertinents.

3.6 Équipements disponibles pertinents pour microfabrication de matériaux acoustiques

Les 3 procédés utilisés dans la suite de ce mémoire pour réaliser des structures acoustiques utilisent des équipements de base communs. Ces 3 procédés employés sont issus de la fusion des familles « Déposition par extrusion » et « Polymérisation par agent extérieur ». Il ne s'agit pas de procédés commerciaux traditionnels. Ils sont en effet dédiés à l'impression de matériaux spécifiques différents de ceux trouvés par exemple sur le procédé FDM. Par ailleurs, ces procédés permettent la création de structures beaucoup plus fines et précises.

Les procédés divergent ensuite dans les matériaux, processus physico-chimique et procédures d'impression ou obtention de la pièce finale.

3.6.1 Station de travail

L'impression de microsystèmes requiert des équipements de précision permettant de contrôler la déposition de matière et assurer ainsi le tolérancement dimensionnel des pièces réalisées.

Pour cela, un robot possédant 3 axes numériques de précision est utilisé. Il permet via un logiciel propriétaire de commander au robot un trajet dans l'espace tridimensionnel. Une tête d'impression interchangeable en fonction du procédé et matériau utilisé est solidaire de la broche du robot. Elle comporte le vérin pneumatique, le porte seringue et une seringue contenant le matériau d'impression comme montré sur la Figure 3-2.

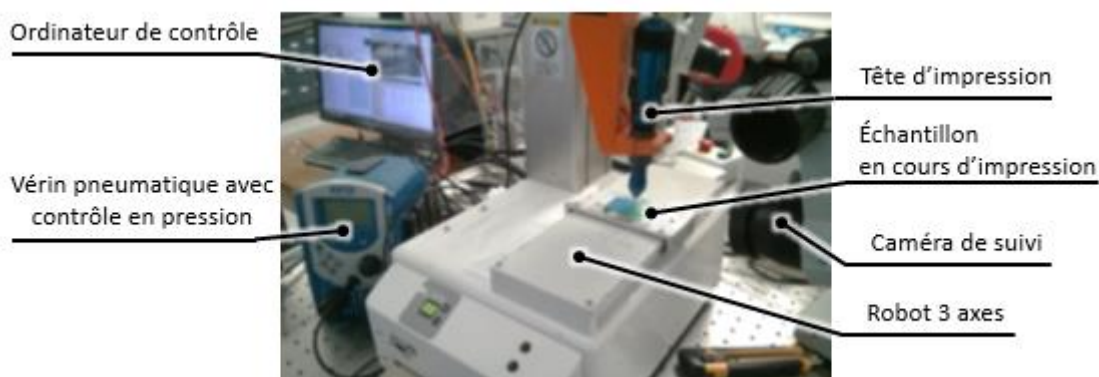


Figure 3-2 : Station de microfabrication additive au laboratoire LM²

Le robot de déposition est associé à un ordinateur de contrôle destiné à communiquer les instructions de travail. Une caméra permet le suivi de l'impression et le réglage précis des conditions initiales de position de la buse vis-à-vis du substrat sur lequel est déposé le matériau.

3.6.2 Logiciels employés

Le robot de déposition reçoit les informations d'un logiciel propriétaire nommé « *JR Points for dispensing* ». Les données d'entrée de ce logiciel consistent en la succession des points de passage du robot, la vitesse d'impression ainsi que de la mise en pression ou non de la seringue.

La trajectoire d'impression est quant à elle générée sous tableur et permet de modifier chaque point individuellement ou de modifier le motif imprimé. Une fois le programme d'impression généré sous tableur, il est transposé au sein du logiciel propriétaire pour être finalement transféré au robot.

Grâce à la mise en commun de ces équipements, il est donc possible de contrôler la déposition précise de filaments matière dans un espace tridimensionnel, en contrôlant les paramètres d'impression tels que la vitesse d'extrusion, la position et vitesse de déplacement de la buse d'impression.

3.6.3 Écriture directe par solidification avec évaporation de solvant

Une tête d'impression spéciale permet d'extruder avec un dispositif de contrôle en pression une solution contenue dans une seringue. Le procédé illustré à la Figure 3-3 permet par l'évaporation d'un solvant de solidifier le filament de matière après extrusion. Il permet d'imprimer n'importe quel matériau pouvant être maintenu en suspension dans un solvant adéquat.

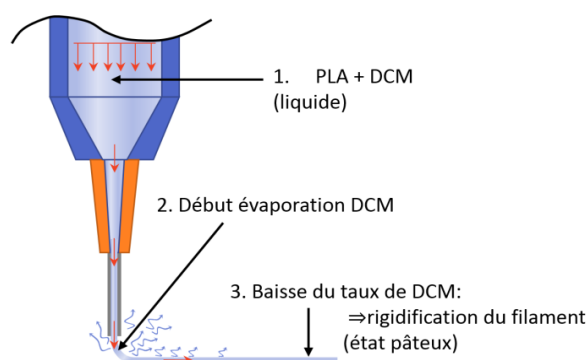


Figure 3-3 : Illustration du procédé par l'évaporation de dichlorométhane (DCM) mélangé à l'acide polylactique (PLA) (Guo, Heuzey, & Therriault, 2014)

Étapes du procédé :

- Déposition en filaments du matériau + solvant par une buse calibrée
- Échafaudage de filaments après plusieurs dépositions
- Évaporation progressive du solvant contenu dans le matériau extrudé après sortie de la buse
- Obtention d'une structure rigide du matériau final, débarrassé du solvant.

Différents matériaux tels que du chitosan, du polychlorure de vinylidène, ou encore du PLA avec des nanotubes de carbones peuvent être imprimés avec cette méthode (Chizari & Therriault, 2015; Guo et al., 2014; Therriault, Shepherd, White, & Lewis, 2005).

Des échantillons ont été fabriqués par ce procédé avec une solution de PLA+DCM. Des travaux antérieurs (Guo et al., 2014) ont permis d'évaluer les capacités de ce procédé pour la génération de structure 3D. Néanmoins le fort retrait subi par la structure lors de l'évaporation du solvant ne permet pas d'obtenir des échantillons de grande dimension avec une structure régulière susceptible d'être caractérisée dans le tube d'impédance.

3.6.4 Écriture directe d'encre sacrificielle + imprégnation

Ce procédé se déroule en deux grandes étapes qui aboutissent à l'obtention du négatif de la structure imprimée par fabrication additive, d'où la désignation du matériau imprimé de « cire ou encre sacrificielle ».

Il permet d'imprimer à l'aide d'une tête d'impression modifiée la déposition de filaments de cire selon un tracé spécifié par l'utilisateur. Par coulée gravitaire, l'échafaudage de cire est ensuite imprégné par une résine polymérisable. Une fois la polymérisation de la résine complétée, on chauffe le produit à une température supérieure pour faire fondre la cire et ainsi révéler un réseau de microcanaux, de la taille et de la forme des filaments de cire. Il s'agit donc au final d'un négatif de fabrication additive.

Ce procédé a été étudié pour la réalisation de structures acoustiques. L'échantillon réalisé par cette méthode est montré à la Figure 3-4. L'obtention d'échantillons pour caractérisation acoustique n'a pas été possible, l'imprégnation gravitaire du réseau étant délicate.

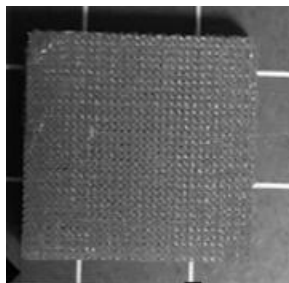


Figure 3-4 : Échantillon réalisé par imprégnation gravitaire d'un échafaudage de filaments de cire

3.6.5 Écriture directe de polymères thermodurcissables

Enfin, un troisième procédé a été utilisé durant ce projet et a permis d'obtenir des structures caractérisables mécaniquement et acoustiquement qui sont présentés dans la suite de ce mémoire. Le principe d'impression est semblable au premier procédé d'écriture directe par solidification avec évaporation de solvant. Le matériau est extrudé par une buse calibrée et déposé sur un substrat.

3.7 Conclusion du chapitre :

Les procédés appartenant au domaine de la fabrication additive sont variés et ne sont pas tous indiqués dans la génération de microstructures poreuses acoustiques. Une sélection des familles de procédés a été réalisée. Un partenariat avec le LM² a ensuite permis d'avoir accès à des procédés spécifiques de micro fabrication additive. Les trois procédés présentés ci-dessus illustre le potentiel offert par la fabrication additive dans la réalisation de microstructures. Le développement

de machines de micro impression permet le contrôle de la matière à une échelle micrométrique et de manière déterminée et répétable. Par ailleurs la grande diversité des matériaux applicables permet d'imaginer une optimisation du matériau constitutif de la phase solide du matériau poreux.

Nous allons maintenant nous intéresser aux modèles acoustiques permettant d'optimiser l'absorption acoustique des milieux poreux pour mieux concevoir des architectures imprimables par les procédés de fabrication additive.

CHAPITRE 4 MODÈLES ACOUSTIQUES ADAPTÉS POUR MICROSTRUCTURES PAR FABRICATION ADDITIVE

Pour être efficace au sein d'une turbosoufflante, les traitements acoustiques doivent posséder une impédance spécifique pour atténuer l'onde acoustique. Dans ce chapitre l'optimisation de deux types de structures est traitée. Tout d'abord, un réseau de microcanaux interconnectés selon le modèle décrit à la section 1.8. Puis l'optimisation d'un micro-treillis ordonné (aussi appelé *micro-lattice* en anglais) pour obtenir une dissipation importante de l'énergie acoustique tout en contrôlant les propriétés mécaniques de la structure. Pour cela, les modèles présentés aux Sections 1.7, 1.8 et 1.9 sont modifiés ou complétés pour utiliser les paramètres d'impression de la fabrication additive et ainsi lier le comportement acoustique aux microstructures générées.

4.1 Réseau de microcanaux ordonnés

Dans le cas d'une optimisation de l'impédance matériau pour une implantation comme revêtement acoustique, on décide d'optimiser les microcanaux pour les impédances ciblées. Le procédé d'écriture directe d'encre sacrificielle puis imprégnation est utilisé pour réaliser ce type de structure (Section 3.6.4).

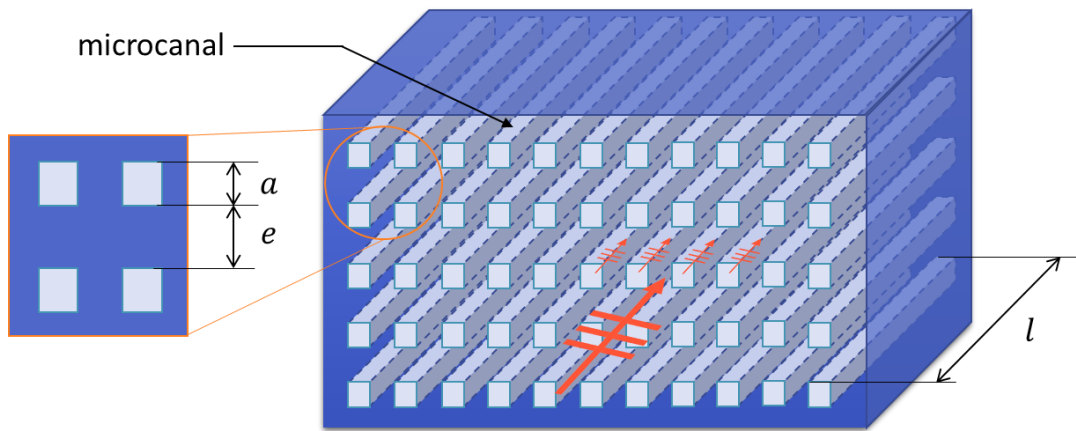


Figure 4-1 - Architecture théorique

Les paramètres de la microstructure obtenus grâce au modèle présenté en Section 1.8 sont:

- › Diamètre des microcanaux : $2r_{tube} = \frac{1}{550} \lambda_{spéc}$
- › Épaisseur cloisons entre microcanaux : $e_{cloison} = \frac{1}{10000} \lambda_{spéc}$

➤ Épaisseur du traitement optimale : $e_{liner_{opt}} = e_{spéc}$

Ils sont exprimés en fonction de la longueur d'onde spécifique haute fréquence $\lambda_{spéc}$ caractérisée par une absorption acoustique $\alpha = 1$.

Le module polytropique associé à cette architecture, l'impédance et l'absorption sont donnés dans les Figure 4-2 et Figure 4-3.

Ils montrent que le module polytropique augmente fortement en fonction du nombre de Prandtl et du nombre d'onde en cisaillement ce qui montre une augmentation de l'échange d'énergie entre l'onde acoustique et la structure. Cette dissipation est obtenue pour des fréquences élevées possédant une longueur d'onde plus faible et donc un nombre d'onde en cisaillement dans le microcanal plus élevé. Le régime d'écoulement porté par le nombre de Prandtl est quant à lui lié à la couche limite de cisaillement et au profil de distribution des vitesses particulière dans le microcanal, plus le nombre de Prandtl sera élevé plus le gradient de vitesse sera important dans le microcanal et la dissipation visqueuse qui l'accompagne.

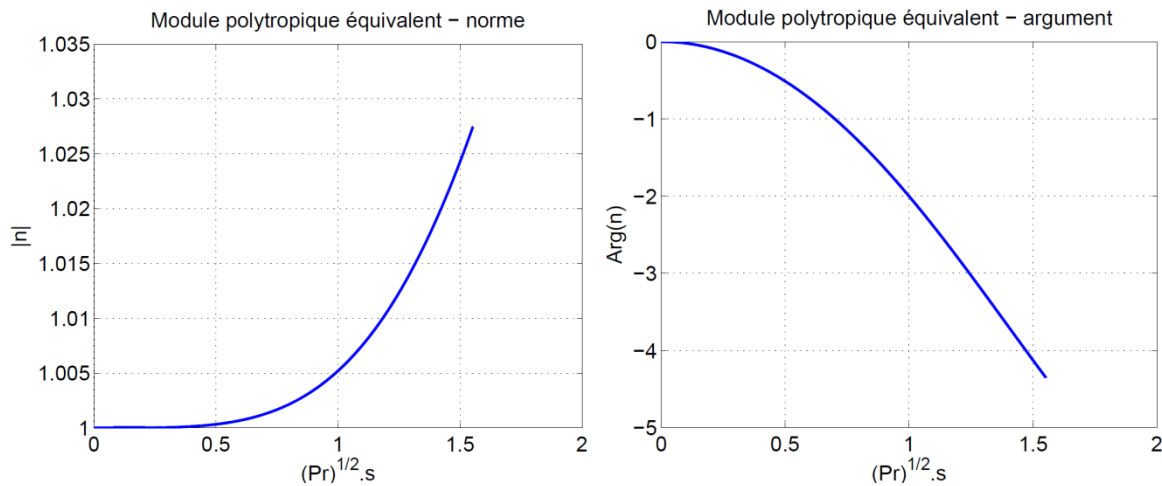


Figure 4-2: Module polytropique d'un traitement acoustique par microcanaux optimisé

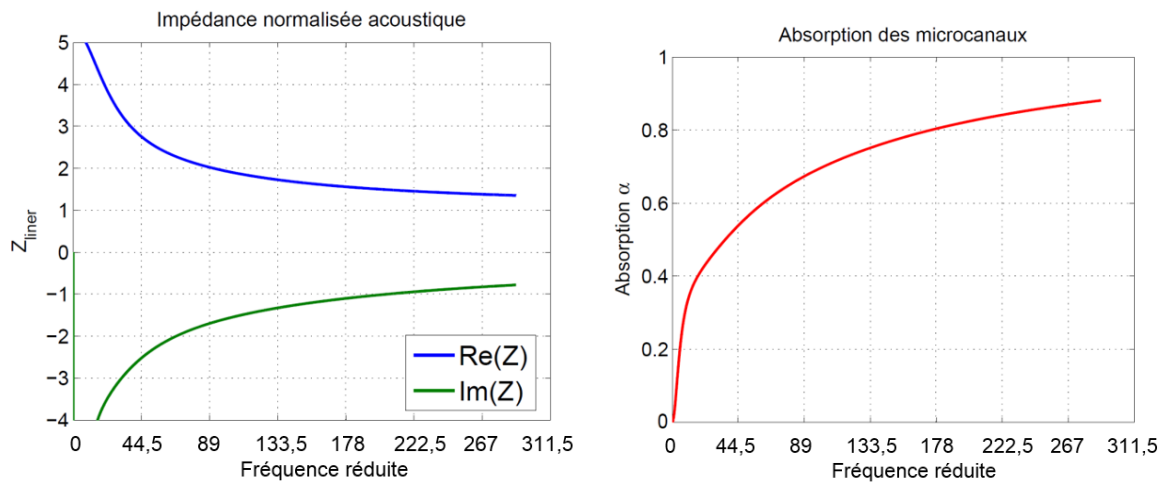


Figure 4-3 : Impédance normalisée et absorption d'un traitement acoustique par microcanaux optimisé

Cette architecture semble difficile à réaliser avec les procédés de fabrication additive présentés précédemment car les membranes demandées entre les canaux sont très fines. De plus le modèle considère les parois des microcanaux parfaitement rigides, ce qui est difficilement réalisables pour des parois aussi fines. Par ailleurs, l'absorption promise par les microcanaux semble particulièrement pertinente pour la réalisation d'un traitement acoustique. Sa réalisation par les procédés utilisés dans ce mémoire n'est toutefois pas envisageable. Des structures du type microcanaux plus grossières seront générées pour évaluer leur comportement à titre indicatif.

L'impression d'un réseau de microcanaux est en revanche susceptible d'être accessible par le procédé utilisant la cire sacrificielle.

4.2 Optimisation des paramètres de microstructures filamenteuses pour absorption

Le modèle AML (Section 1.9) permet de calculer analytiquement les paramètres influençant la dissipation acoustique dans un réseau ordonné de filaments/fibres.

Une étude paramétrique a été entreprise afin de calculer les paramètres optimaux en absorption acoustique de ce type de réseau. L'intérêt de cette étude est double, connaître le potentiel de réduction associé à ce type de structure et vérifier la capacité des procédés de micro-impression 3D pour la fabrication de ces microstructures.

4.2.1 Architecture poreuse considérée

La structure choisie pour l'étude paramétrique est celle présentée dans le modèle précédent. Deux paramètres suffisent à décrire cette structure comme montré sur la

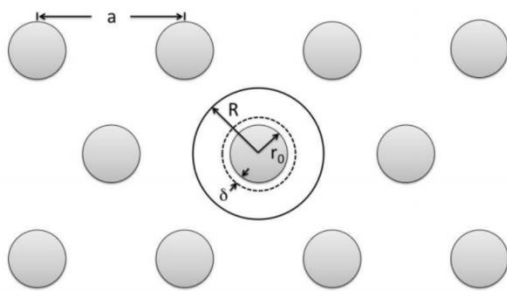


Figure 4-4.

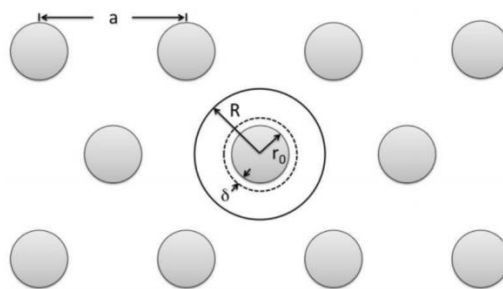


Figure 4-4 : Structure de cristal sonore

r_0 et w_f : paramètres principaux de l'étude paramétrique

a et w : paramètres secondaires descriptifs

Les **paramètres principaux** sont donc :

- le rayon du filament d'impression r_0 employé durant la fabrication
- le taux de remplissage défini par la relation $w_f = 1 - \phi$

Les **paramètres secondaires** utiles à la description du réseau sont :

- le paramètre de maille a : correspondant au l'écart de déposition entre deux filament prescrit au robot d'impression.
- longueur libre de passage pour l'onde acoustique notée w

Dans la suite de l'étude, on exprimera le diamètre de filament d'impression en fonction du diamètre spécifique définie par le rapport au diamètre standard d'impression par procédé FDM.

Domaine de variation paramétrique appliqué :

$$r_0 \in [0,0125 D_{spéc}; 1,25 D_{spéc}] \text{ avec } \Delta r_0 = 0,0125 D_{spéc},$$

$$w_f \in [1\% ; 100\%] \text{ avec } \Delta w_f = 1\%,$$

Les paramètres secondaires tels que le paramètre de maille a et l'espacement inter-filamentaire spécifique w sont quant à eux liés :

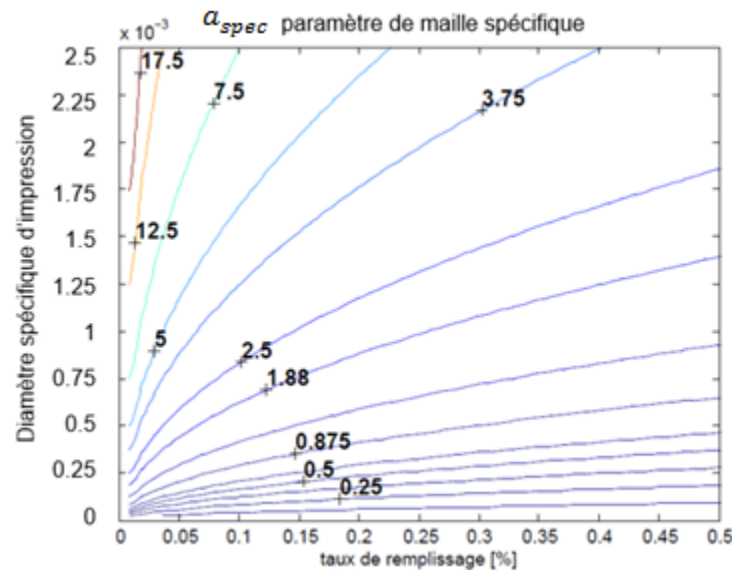


Figure 4-5 : Évolution du paramètre de maille spécifique a_{spec} en fonction de r_0 et w_f

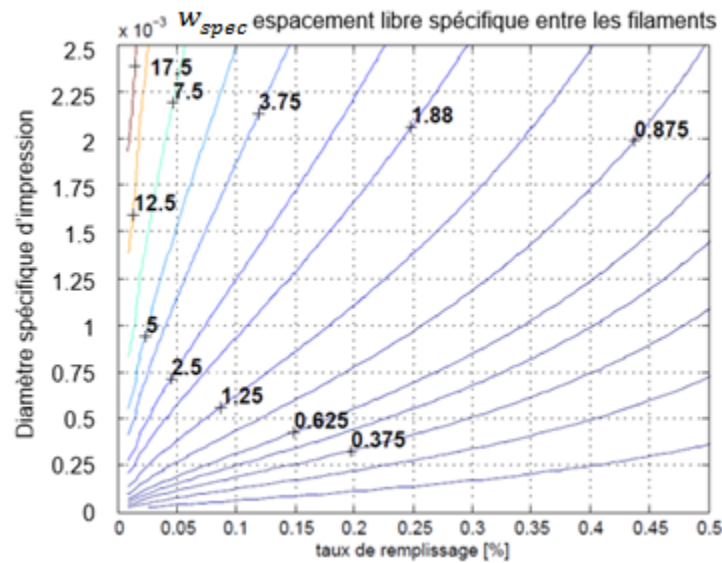


Figure 4-6 : Évolution de la longueur libre spécifique de passage w_{spec} en fonction de r_0 et w_f

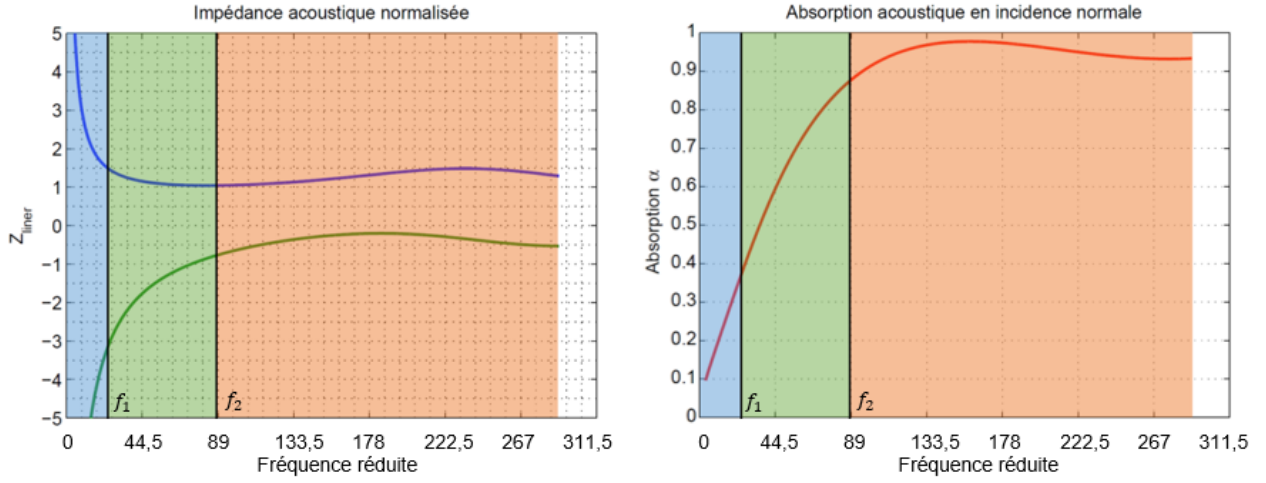
Grâce aux variations portées sur les variables principales montrés aux Figure 4-5 et Figure 4-6, les valeurs secondaires balayent largement les différents cristaux soniques qui pourraient être réalisés à des fins acoustiques.

4.2.2 Méthode d'analyse des performances des cristaux soniques

D'après les paramètres principaux et le modèle décrit en section 5.3.1, à un couple (r_0, w_f) correspond donc une impédance acoustique d'un cristal sonique et sa courbe d'absorption.

a) Bandes fréquentielles d'intérêt

Afin d'observer le comportement de ce type de réseau, on scinde l'espace fréquentiel réduit étudié soit $[3,6 kr; 289 kr]$ en trois zones :



- Basses fréquences : $BF = [3,6; f_1]$
- Moyennes fréquences : $MF = [f_1; f_2]$
- Hautes fréquences : $HF = [f_2; 289]$

Avec $f_1 = 22,2 \text{ kr}$ et $f_2 = 89 \text{ kr}$.

Figure 4-7 : Gamme de fréquences considérées

b) Indices de performance :

Sur chacune des bandes fréquentielles, un indice de performance permet de comparer l'absorption des différents cristaux soniques. Cet indice correspond à une moyenne de l'absorption sur une bande de fréquence donnée :

$$I_{BF} = \frac{1}{N_{BF}} \sum_{i=1}^{N_{BF}} \alpha(f_i), \quad \text{si } f \in BF \quad (4-1)$$

$$I_{MF} = \frac{1}{N_{MF}} \sum_{i=1}^{N_{MF}} \alpha(f_i), \quad \text{si } f \in MF \quad (4-2)$$

$$I_{HF} = \frac{1}{N_{HF}} \sum_{i=1}^{N_{HF}} \alpha(f_i), \quad \text{si } f \in HF \quad (4-3)$$

Avec N , le nombre de fréquences discrètes contenues dans le domaine d'intérêt.

Plus l'indice de performance est élevé, plus la structure est absorbante sur la gamme de fréquence considérée. On utilisera donc cet outil pour réaliser une carte de performance des cristaux soniques.

4.2.3 Absorption des cristaux soniques

Les résultats issus de cette étude paramétrique vont maintenant être présentés. Ces résultats seront ensuite comparés avec les valeurs expérimentales obtenues avec les échantillons réalisés. Les résultats ci-dessous sont obtenus pour un traitement typique d'épaisseur $e = 0,8 e_{spéc}$ de traitement acoustique.

a) Comportement en basses fréquences

La carte d'absorption ci-dessous montre l'absorption moyenne observée pour le domaine d'intérêt des basses fréquences (pour rappel : $[3,6 \text{ kr}; 22,2 \text{ kr}]$).

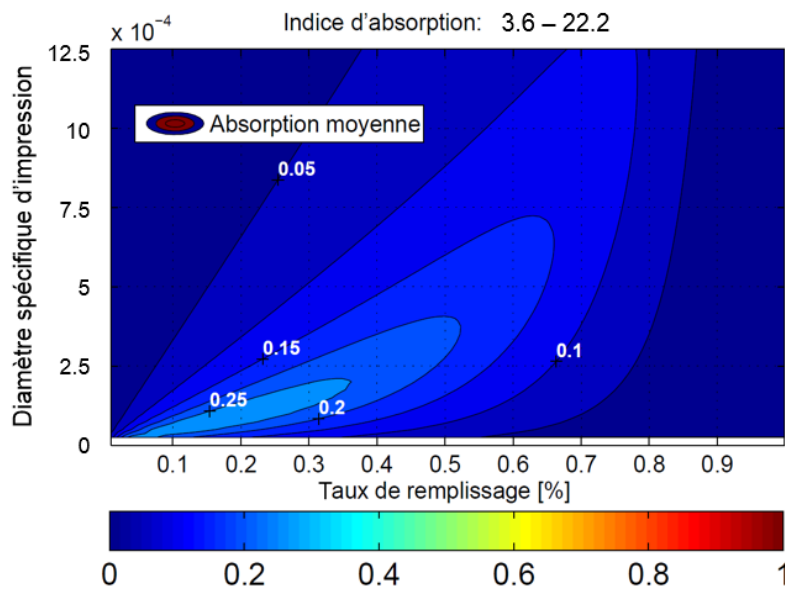


Figure 4-8 : Indice d'absorption en basse fréquences

Cette carte montre que l'absorption pour des fréquences basses est limitée, l'indice de performance maximale relevé étant de 0,29, soit une absorption moyenne d'environ 0,29 entre 3,6 et 22,2 kr . En outre, la zone où les cristaux soniques semblent dissiper l'énergie acoustique est concentrée pour des taux de remplissage faibles (10 à 20%) et des filaments très fins ($< 0,125 D_{spéc}$).

Le cristal sonique idéal à adopter pour une maximisation de l'absorption basse fréquence possède un taux de remplissage de 12% et est constitué de filament de $0,05 D_{spéc}$.

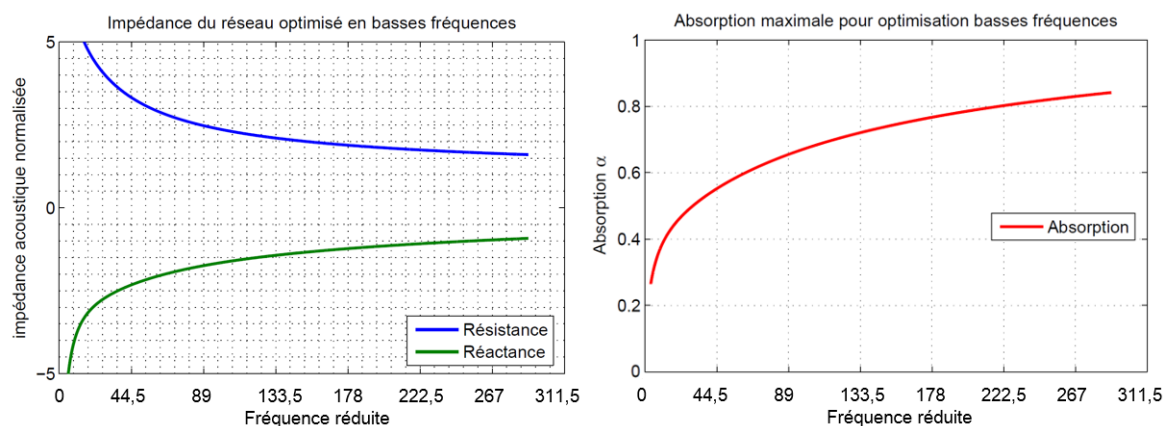


Figure 4-9 : Impédance optimale normalisée et absorption en incidence normale d'un cristal sonique en basses fréquences

Cette configuration possède la caractéristique d'une impédance très stable pour des fréquences réduites supérieures à 44,5 mais ne permet pas d'atteindre, sur la gamme de fréquence considérée, une absorption maximale.

b) Comportement en fréquences intermédiaires

Après avoir observé une absorption prédite par le modèle faible en basse fréquences, les cristaux soniques montrent un potentiel d'absorption plus élevé pour des fréquences réduites s'échelonnant de 22,2 à 89 kr .

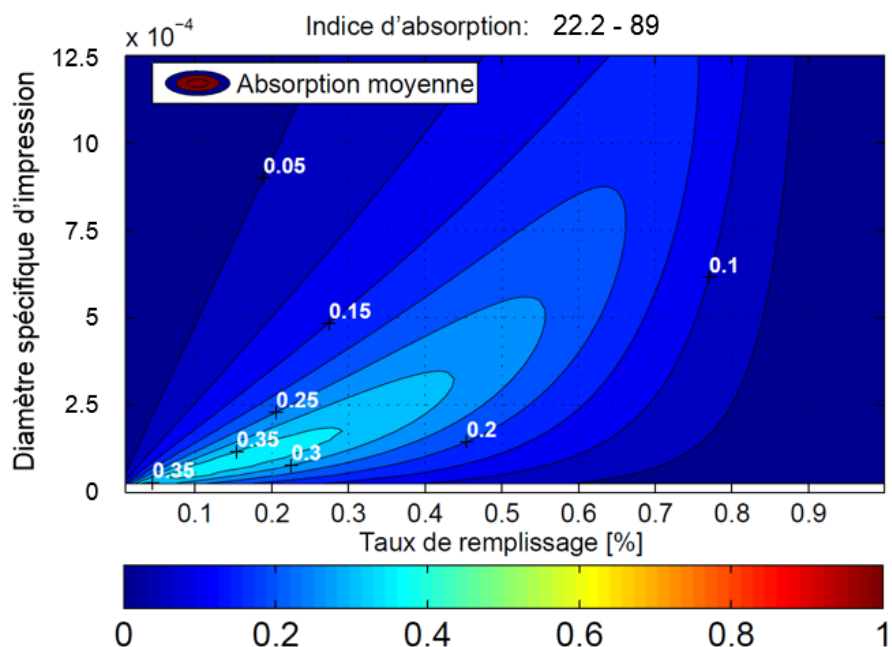


Figure 4-10 : Indice d'absorption pour fréquences intermédiaires

La morphologie générale de la carte reste semblable à celle rencontrée aux basses fréquences. Pour autant, les morphologies présentant des indices d'absorption élevés sont plus dispersés tout en gardant une certaine convergence pour la zone déjà pertinente en basses fréquences.

Comme pour la gamme basse fréquence, le modèle donne une microstructure optimale pour cette gamme fréquentielle.

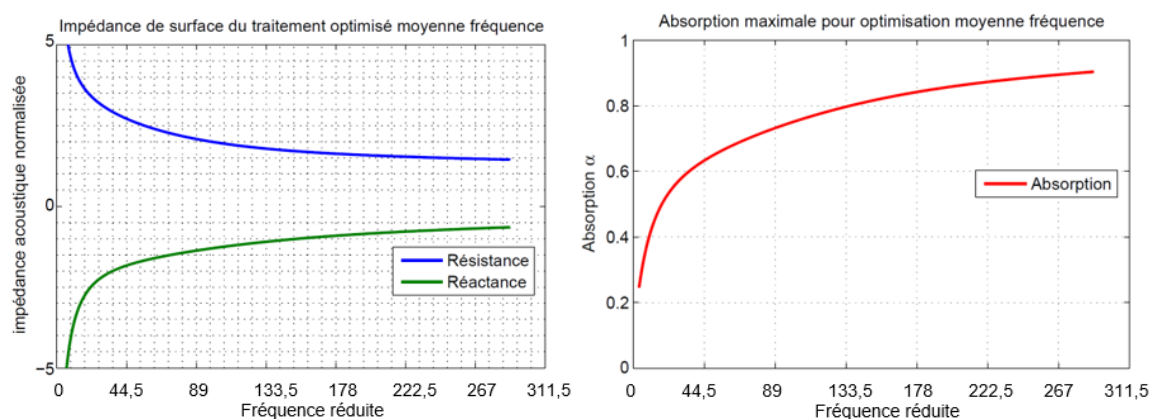


Figure 4-11 : Impédance optimale normalisée et absorption en incidence normale d'un cristal sonique en fréquences intermédiaires

Les propriétés géométriques du cristal sonore sont : un taux de remplissage de 10% et un filament de 0,075 du diamètre spécifique d'impression. L'indice de performance obtenu est de 0,38. Ce cristal possède de plus une absorption élevée pour des fréquences supérieures à 89 *kr*. La modification de la configuration optimale montre également qu'il n'existe pas une unique microstructure capable d'optimiser l'absorption sonore indépendamment de la fréquence.

On note cependant que l'obtention d'une bonne absorption des fréquences intermédiaires est moins contraignante que pour les basses fréquences.

c) Comportement hautes fréquences

Enfin, le comportement théorique hautes fréquences des cristaux soniques modélisés pour des fréquences supérieures à 89 *kr* est présenté ci-dessous. Il montre que ce type de réseau à la microstructure périodique est adapté à la dissipation acoustique notamment pour des longueurs d'ondes qui deviennent de plus en plus proches avec celles du réseau de filaments.

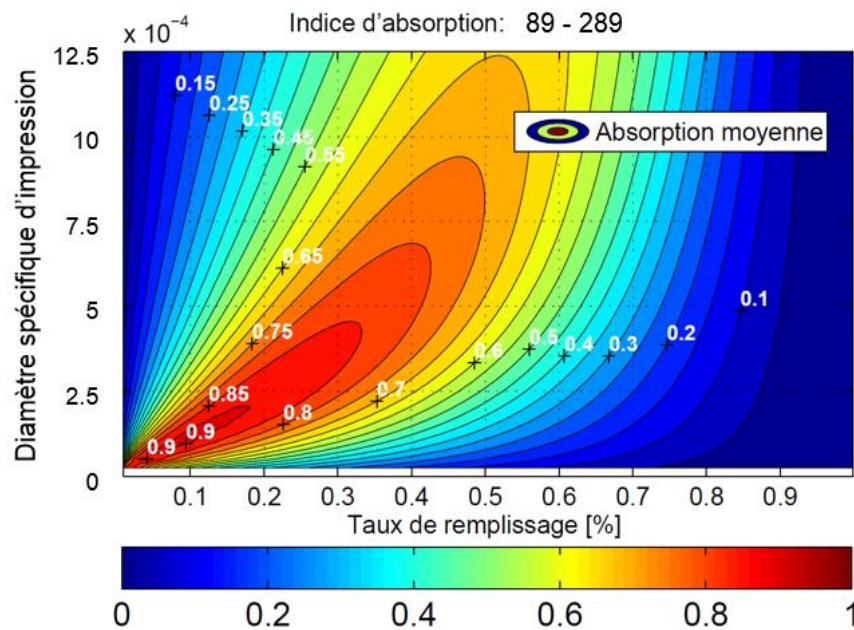


Figure 4-12 : Indice d'absorption hautes fréquences

La carte de performance montre ainsi qu'il est possible d'atteindre une absorption quasi-complète pour des fréquences supérieures à 89 *kr*. Ainsi la valeur maximale de l'indice sur cette gamme fréquentielle atteint 0,91. Par ailleurs la zone possédant les meilleures performances de dissipation acoustique reste sensiblement la même : taux de remplissage entre 5 et 30% et des

diamètres filamenteux de 0.05 à 0.375 du diamètre spécifique. La configuration optimale étant un taux de remplissage de 7% et des filaments de 0.075 dont l'impédance et l'absorption sont présentés ci-dessous.

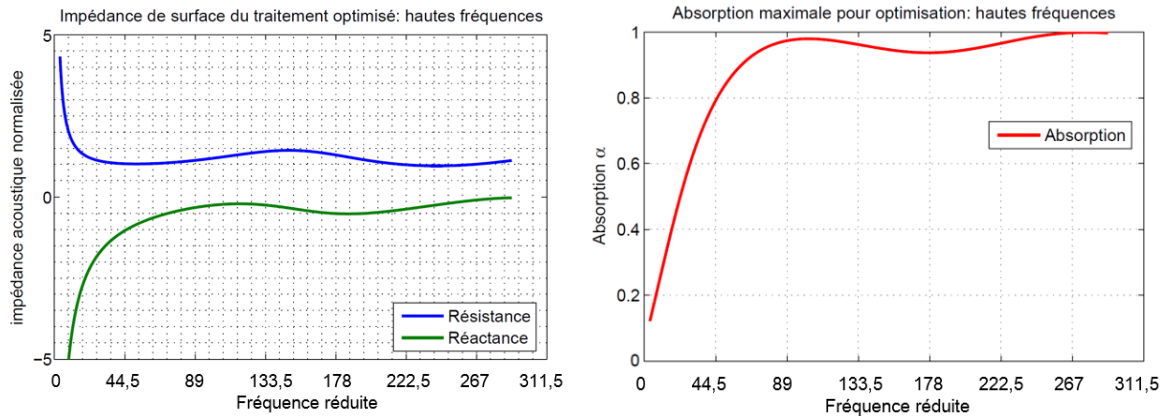


Figure 4-13 : Impédance optimale normalisée et absorption en incidence normale d'un cristal sonique en hautes fréquences

d) Comportement global sur la gamme complète de fréquences $[3,6; 289 \text{ kr}]$

À la vue des résultats obtenus précédemment, les cristaux soniques montrent des capacités d'absorption des ondes acoustiques élevés sur une large bande fréquentielle. La carte global de l'indice d'absorption est donnée ci-après et servira de guide de conception d'échantillons réalisés en fabrication additive pour obtenir les cristaux soniques les plus performants.

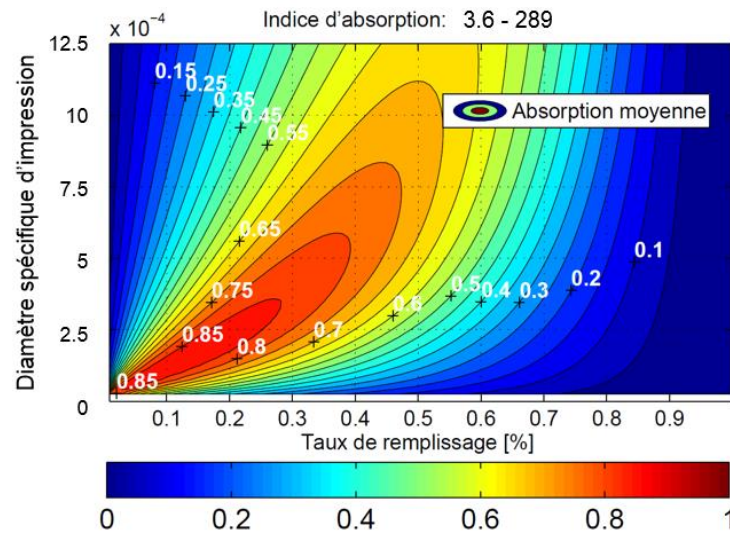


Figure 4-14 : Indice d'absorption cristaux soniques orthogonaux droits [3,6; 289kr]

On rappelle que la résistivité au passage de l'air de ce type de réseau orthogonal droit est donné par :

$$\sigma = \frac{4\eta(1 - \phi)}{r_0^2 \left[-\frac{1}{2} \ln(1 - \phi) + \frac{1}{4} - \phi - \frac{(1 - \phi)^2}{4} \right]} \quad (4-4)$$

La carte des valeurs du logarithme de la résistivité est montrée à la Figure 4-15:

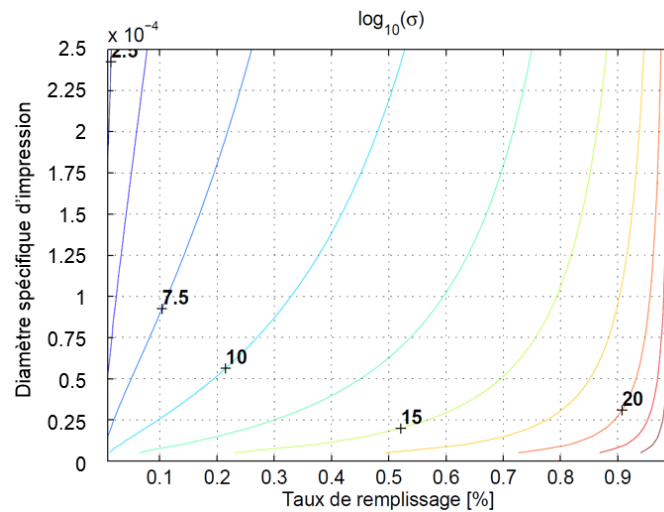


Figure 4-15 : Évolution logarithmique de la résistivité au passage de l'air en fonction des paramètres du cristal sonique

La forme des isovaleurs tracées semblent indiquer qu'il existe une forte corrélation entre l'absorption acoustique des cristaux soniques et leur résistivité. En effet, la zone pertinente pour l'atténuation acoustique est contenue dans une zone présentant des cristaux soniques avec $\sigma \in [10^9; 10^{12}]$. Ce résultat n'est pas spécialement étonnant car si un matériau est trop résistif vis-à-vis de l'onde acoustique celle-ci va être réfléchiée sans atténuation. À l'inverse pour des résistivités plus basses, l'onde acoustique traversera le matériau sans interaction forte avec la microstructure environnante.

D'après le modèle formulé, le cristal sonique permettant la meilleure dissipation acoustique pour la gamme de fréquence $[3,6;289\text{kr}]$ est constitué de filaments $0.075D_{\text{spéc}}$ et possède un taux de porosité de 92%.

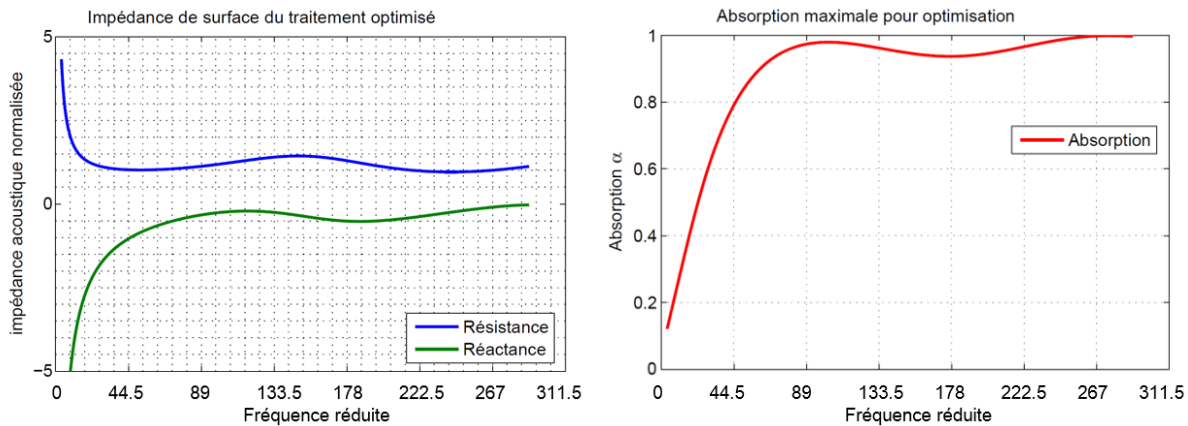


Figure 4-16 : Impédance optimale normalisée et absorption en incidence normale d'un cristal sonique de 40mm d'épaisseur pour $f \in [3,6;289\text{kr}]$

La microstructure décrite par ce traitement optimal par un cristal sonique est très proche de la microstructure rencontrée au sein de la mousse de mélamine dont une micrographie est montrée à la Figure 4-17.



Figure 4-17 : Microscopie de mousse de mélamine (Basotect)

Ce matériau est célèbre dans le domaine de l'acoustique pour ses propriétés absorbantes et est souvent utilisé pour de l'isolation phonique de studios musicaux. Il n'est donc pas étonnant de retrouver cette microstructure pour des cristaux soniques pour le spectre d'absorption considéré.

Les paramètres de Biot pour le modèle JCA obtenus par Dupont et al. (2013) sont donnés dans le

Tableau 4-1 : Paramètres de Biot de la mousse de mélamine (Dupont et al., 2013)

	ϕ	α_∞	$\sigma \text{ (Pa.s/m}^2\text{)}$	$\Lambda \text{ (}\mu\text{m)}$	$\Lambda' \text{ (}\mu\text{m)}$
<i>Mousse de mélamine</i>	0,982	1,03	9958	90	180

4.3 Modèle de traitement multipropriétés (Modèle MML : *Multi Materials Liners*)

4.3.1 Théorie et formulation

Le modèle présenté ci-dessous permet de prédire le comportement acoustique d'un traitement constitué de multiples matériaux avec épaisseurs différentes. Ultérieurement, le code MATLAB associé pourra être utilisé pour étudier l'impact d'un gradient de propriété sur l'impédance d'un traitement acoustique.

Le spectre fréquentiel de validité expérimentale est restreint à la capacité de fonctionnement du tube d'impédance disponible au laboratoire selon la norme ASTM E1050 (Standard, 1998). Les valeurs expérimentales présentes dans ce mémoire sont valables uniquement dans le domaine fréquentiel exploitable à partir de 10 kr environ. Les modèles acoustiques couvent quant à eux tout le domaine du graphique.

Ce modèle fait appel à la méthode des matrices de transfert afin de calculer l'impédance équivalente d'un assemblage de différents matériaux acoustiques. Pour cela, il s'appuie sur la modèle AML présentée précédemment qui permet de prédire le nombre d'onde associé à la propagation de l'onde acoustique au travers des différents matériaux qui constituent le traitement.

Dans le cadre de ce mémoire, on décrit le modèle avec un empilement maximal de 5 milieux distincts. Le code associé est néanmoins transposable à un plus grand nombre de milieux du moment que ceux-ci puissent être assimilés soit à une impédance de surface ou un fluide équivalent selon la théorie de Biot (Biot, 1956).

La pression acoustique $p(x, t)$ à l'intérieur du tube d'impédance est décrite par l'expression classique d'une onde propagatrice unidirectionnelle:

$$p(x, t) = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (4-5)$$

Et la vitesse particulière v_x d'une onde plane harmonique selon la direction de propagation x est alors :

$$v_x(x, t) = \frac{1}{Z_i} p(x, t) \quad (4-6)$$

Avec Z_i l'impédance caractéristique du milieu propagatif :

$$Z_i = \sqrt{\rho_i K_i} \quad (4-7)$$

Dans le cas de matériau poreux dissipatif on a vu que le nombre d'onde et l'impédance prenaient des valeurs complexes :

$$k_i = \text{Re}(k_i) + j \text{Im}(k_i) \quad (4-8)$$

$$Z_i = \text{Re}(Z_i) + j \text{Im}(Z_i) \quad p(x, t) = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (4-9)$$

L'onde acoustique totale présente au sein du tube est la superposition de deux ondes acoustiques.

L'onde acoustique se propageant négativement selon l'axe des abscisses s'écrit

$$p'(x, t) = A' e^{j(\omega t + kx)} \quad (4-10)$$

$$v'(x, t) = -\frac{A'}{Z_i} e^{j(\omega t + kx)} \quad (4-11)$$

L'onde totale est donc :

$$p_T(x, t) = A e^{j(\omega t - kx)} + A' e^{j(\omega t + kx)} \quad (4-12)$$

$$v_T(x, t) = \frac{A}{Z_i} e^{j(\omega t - kx)} - \frac{A'}{Z_i} e^{j(\omega t + kx)} \quad (4-13)$$

La variation d'impédance le long de la direction de propagation est donc

$$Z(M_i) = \frac{p_T(M_i)}{v_T(M_i)} \quad (4-14)$$

Maintenant que l'impédance d'une section sur l'axe de propagation est connue on présente l'empilement suivant de milieux propagatifs. Cette configuration illustre l'association de 5 milieux différents de propagation notés de 1 (matériau en paroi libre) à 5 (matériau contre la paroi rigide) dans un tube d'impédance. Le but est de connaître l'impédance de surface équivalente au point M_{10} .

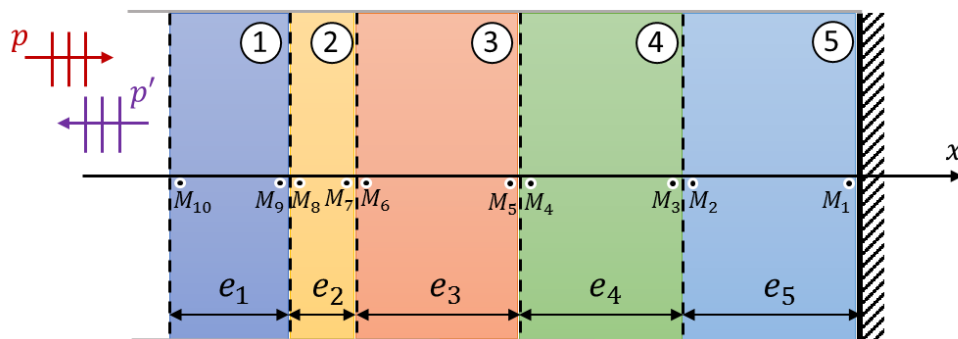


Figure 4-18 : Association de 5 milieux aux propriétés différentes dans un tube d'impédance.

Les différents milieux et leurs épaisseurs respectives sont notées de 1 à 5.

Les impédances de chacun des échantillons ont été préalablement répertoriés individuellement (Figure 4-19).

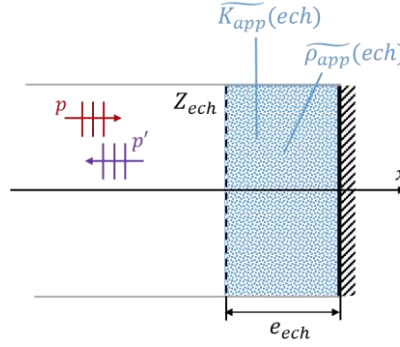


Figure 4-19 : Propriétés de fluide équivalent déterminées par mesure de l'échantillon au tube d'impédance et paramètres de la microstructure

Ainsi pour l'échantillon seul, l'impédance utilisée est :

$$Z_1 = Re(Z_1^{exp}) + j Im(Z_1^{exp}) \quad (4-15)$$

avec Z_1^{exp} l'impédance expérimentale obtenue pour l'échantillon seul dans le tube d'impédance comme illustré à la Figure 4-19.

L'impédance pure de l'échantillon, indépendant de son épaisseur est:

$$Z'_1 = \frac{Z_1 e_{ech1}}{-j \cot(k_1 e_{ech1})} \quad (4-16)$$

À l'aide du modèle AML, les propriétés de propagation du milieu 1 sont :

$$k'_1 = \omega \sqrt{\frac{\widetilde{\rho}_{eq}(ech1)}{\widetilde{K}_{eq}(ech1)}} \quad (4-17)$$

$$c'_1 = \frac{\omega}{Re(k_{ech1})} \quad (4-18)$$

De cette manière, les propriétés de l'échantillon 1 sont assignées au milieu 1. La différence majeure est que le milieu 1 peut avoir une épaisseur variable, contrairement à l'échantillon fabriqué d'épaisseur fixe.

Chacun des 5 milieux se voit attribué ses propriétés acoustiques avec cette méthode.

Une fois les milieux de propagation connus, l'impédance de surface de l'empilement peut être déterminée.

L'impédance au point M_2 est fonction du milieu de propagation 5 et de l'impédance à la surface M_1 tel que :

$$Z(M_2) = -j Z'_5 \cot(k'_5 e_5) \quad (4-19)$$

Car le mur en M_1 est supposé infiniment rigide, d'où $Z(M_1) \rightarrow \infty$.

À l'interface entre les deux milieux 1 et 2, la continuité de pression et de la vitesse particulaire est assurée par :

$$Z(M_2) = Z(M_3) \quad (4-20)$$

Cette condition est également vraie pour les interfaces entre les milieux subséquents d'où les relations:

$$Z(M_4) = Z(M_5); \quad Z(M_6) = Z(M_7); \quad Z(M_8) = Z(M_9); \quad (4-21)$$

Pour passer de l'impédance du point M_3 à M_4 d'après la méthode des matrices de transfert (J.-F. Allard & Atalla, 1993; Cai, Yang, & Hu, 2015) appliquée en incidence normale:

$$Z(M_4) = Z'_4 \frac{-j Z(M_3) \cot(k'_4 e_4) + Z'_4}{Z(M_3) - j Z'_4 \cot(k'_4 e_4)} \quad (4-22)$$

La même méthode est appliquée aux milieux suivants jusqu'au point M_{10} . L'impédance équivalente des 5 milieux notée Z_{liner} est $Z(M_{10})$.

$$Z_{liner} = Z'_1 \frac{-j Z(M_9) \cot(k'_1 e_1) + Z'_1}{Z(M_9) - j Z'_1 \cot(k'_1 e_1)} \quad (4-23)$$

Une fois l'impédance équivalente de l'empilement obtenu, le coefficient d'absorption est obtenu via l'indice de réflexion :

$$R(Liner) = \frac{p'(M_{10}, t)}{p(M_{10}, t)} \quad (4-24)$$

Ce qui nous donne :

$$R(Liner) = \frac{Z(M_{10}) - Z_0}{Z(M_{10}) + Z_0} \quad (4-25)$$

Et finalement :

$$\alpha(Liner) = 1 - |R(M_{10})|^2 \quad (4-26)$$

4.3.2 Validation du code MML

Le code développé va maintenant être comparé avec les mesures expérimentales réalisées sur un tube d'impédance à incidence normale communément appelé tube de Kundt, du nom de son inventeur. Le tube d'impédance permet grâce à deux microphones de connaître les caractéristiques de l'onde acoustiques incidente et réfléchie contenue dans un tube dont la terminaison possède une impédance spécifique. Par traitement des signaux relevés aux microphones, il est possible de connaître l'impédance acoustique normalisée et l'absorption d'un matériau.

Afin de s'assurer de la validité du modèle explicité ci-dessus, les résultats expérimentaux issus des mesures d'impédances de mousses métalliques sont utilisés. Il s'agit de mousse en alliage de nickel dont la microstructure est illustrée à la Figure 1-17.

Ce matériau a par ailleurs servi de matériau étalon pour la calibration du tube d'impédance.



Figure 4-20 : Galette de mousse métallique, épaisseur $1/10$ d' $e_{spéc}$

Les échantillons se présentent sous la forme de galettes de 5mm d'épaisseur (Figure 4-20) qui sont empilés pour générer les épaisseurs 2/10, 3/10, 4/10, 5/10, 6/10 d' $e_{spéc}$.

Les résultats ci-après présentent, pour chaque épaisseur considérées, les impédances et absorptions obtenues par expérimentation sur tube d'impédance (notés EXP) et par propagation du milieu par le modèle MML (notés MML). L'extraction des propriétés d'un fluide équivalent propagé est obtenue à partir de l'échantillon initial d'un dixième de l'épaisseur spécifique.

4.3.3 Extraction de l'information : impédance matériau

Ce premier test utilisant un dixième d'épaisseur spécifique de mousse vérifie que l'on extrait correctement l'impédance pure du matériau indépendamment de l'épaisseur de l'échantillon initial. Les propriétés de propagation du fluide équivalent et l'impédance pure sont extraits et on propage ensuite ce milieu sur une épaisseur spécifique d'un dixième. Si le traitement des variables est correct, les résultats doivent être identiques entre l'expérimental et le modèle. Par ailleurs on rappelle par l'intermédiaire de la zone grise sur la Figure 4-21 l'invalidité des résultats expérimentaux en dessous de 8,9 kr.

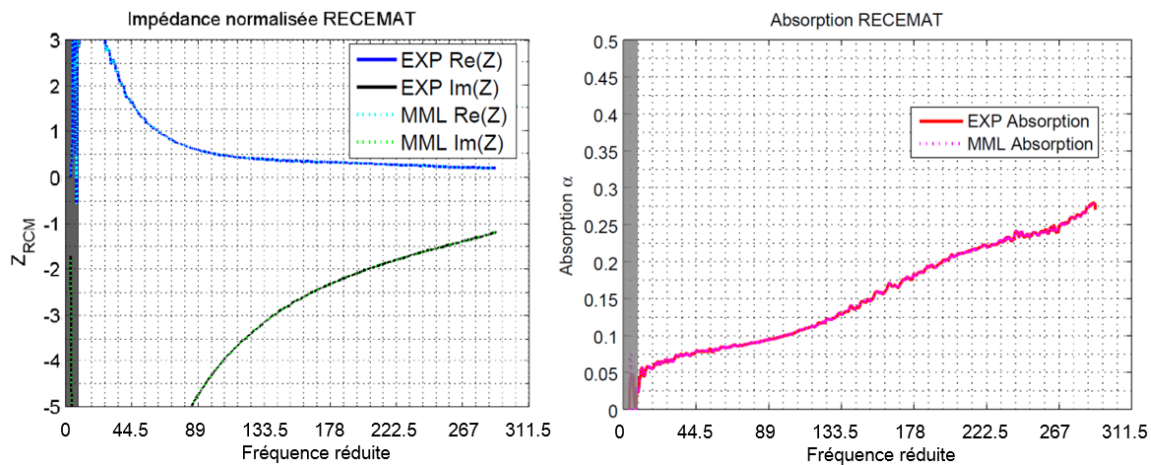


Figure 4-21 : Comparaison des valeurs expérimentales (EXP) versus impédance pure utilisée par le code MML – épaisseur spécifique de mousse 1/10

Les courbes obtenues entre l'expérimental et le modèle sont identiques, l'information est donc correctement extraite de l'échantillon initial.

4.3.4 Simulation de milieu poreux par modélisation de fluides équivalents

Toujours à partir de l'information extraite de l'échantillon initial d'un dixième, on ajoute autant de milieux avec fluide équivalent que l'on veut d'épaisseur de mousse simulée par le modèle. Les équations permettant de calculer les impédances équivalentes sont données précédemment.

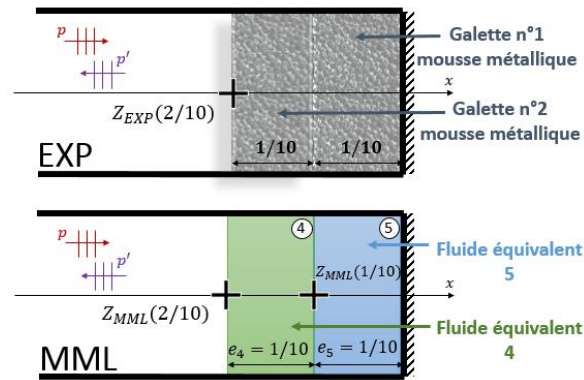


Figure 4-22 : Configuration expérimentale (EXP) versus configuration du modèle (MML)

Le modèle considère donc deux fluides équivalents. Ils ont ici les mêmes propriétés, celles de la mousse métallique.

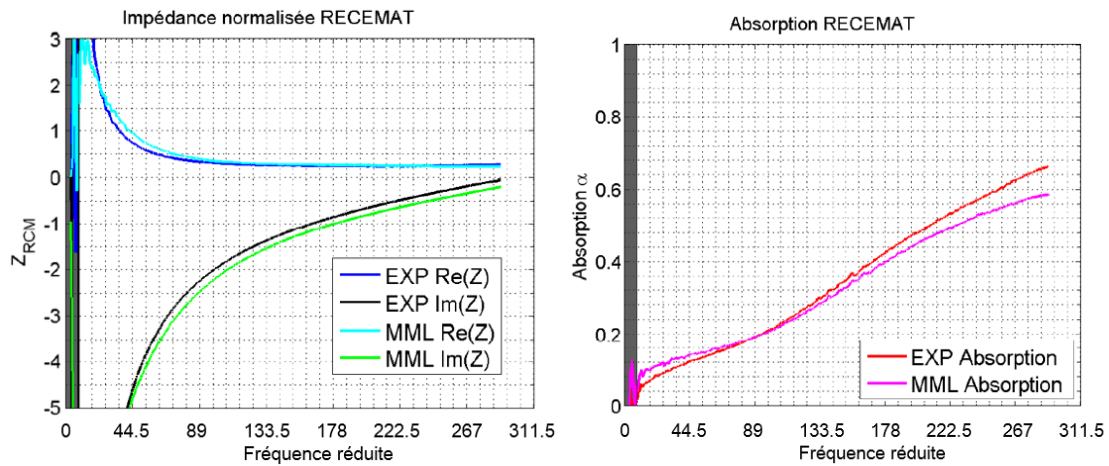


Figure 4-23 : Comparaison EXP versus MML – $2/10 e_{spec}$

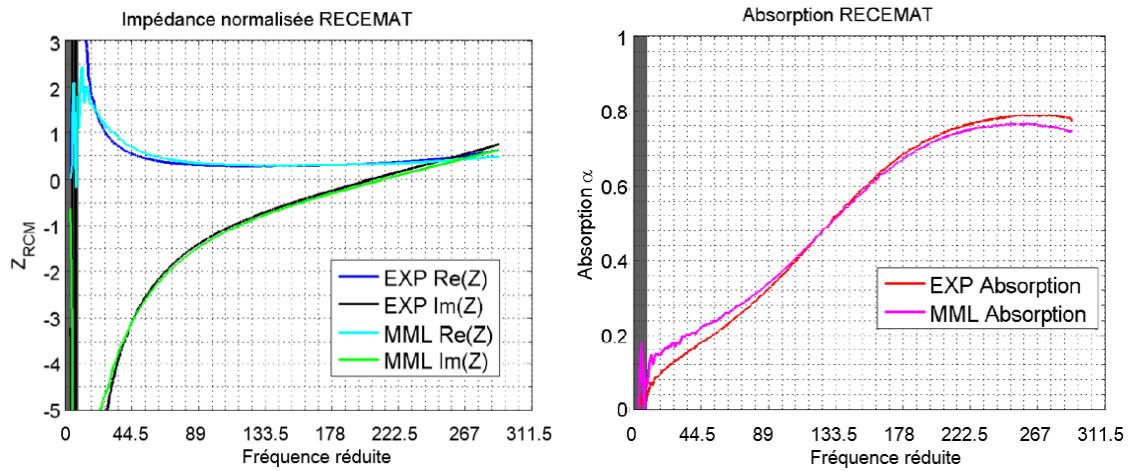


Figure 4-24 : Comparaison EXP versus MML – $3/10 e_{\text{spec}}$

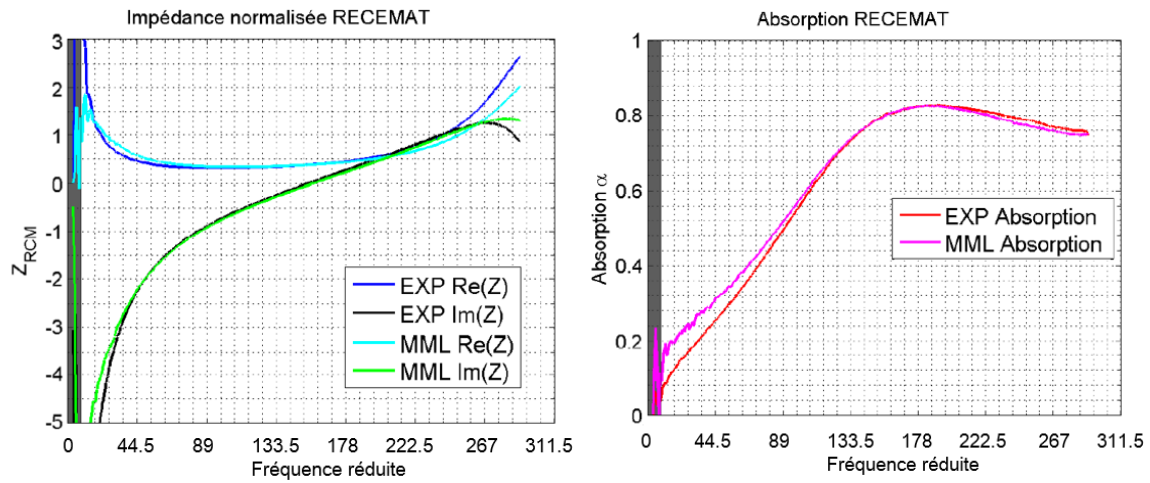


Figure 4-25 : Comparaison EXP versus MML – $4/10 e_{\text{spec}}$

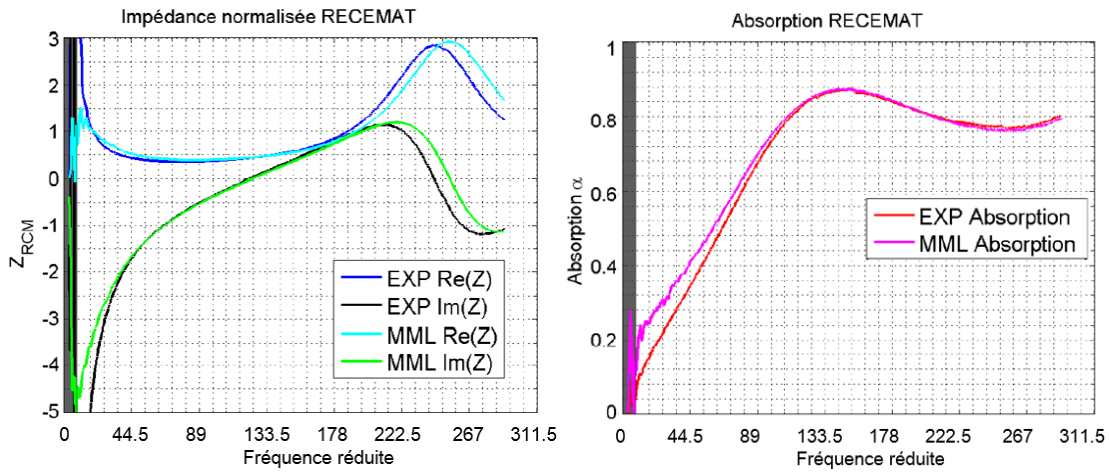


Figure 4-26 : Comparaison EXP versus MML - $5/10 e_{\text{spec}}$

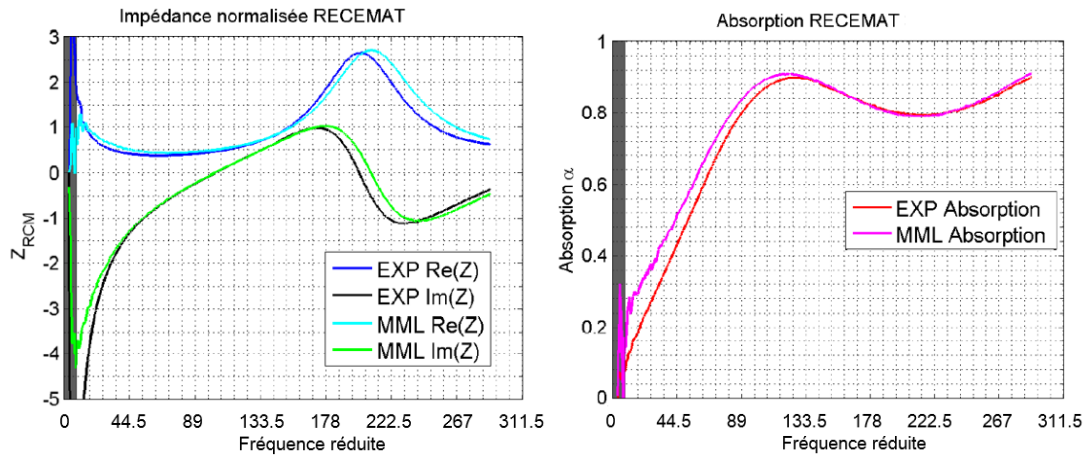


Figure 4-27 : Comparaison EXP versus MML – $6/10 e_{\text{spec}}$

Interprétation :

Les résultats issus du modèle MML consistant à l'association de fluides équivalents simulant un matériau par la théorie de Biot et la méthode des matrices de transfert donnent des résultats proches de l'expérimental. En effet l'écart maximal au pic d'absorption est de 8%, tandis qu'on observe une différence inférieure à 5% sur la prédiction de l'indice de performance global. Il est certain que cette méthode n'est pas aussi précise que la détermination de tous les paramètres de la microstructure d'un modèle JCAPL, néanmoins, elle ne nécessite pas d'équipements annexes pour déterminer la porosité, la tortuosité ou les longueurs caractéristiques.

Cette méthode est également moins précise car elle s'appuie sur les propriétés prédites d'un échantillon d'un dixième d'épaisseur spécifique. Un échantillon de volume plus important doit aider à limiter les dispersions qui pourraient être engendrées par une inhomogénéité de l'échantillon de référence.

De la même manière, il est recommandé de ne pas propager le fluide équivalent au-delà de 500% de l'épaisseur de l'échantillon de référence.

4.3.5 Multiples fluides équivalents versus un fluide équivalent propagé

Pour connaître la déviation engendrée par le modèle, on compare les résultats obtenus en considérant un unique fluide équivalent propagé sur 6/10 de l'épaisseur spécifique avec les résultats précédents. La différence de configuration simulée est illustrée sur la Figure 5-29.

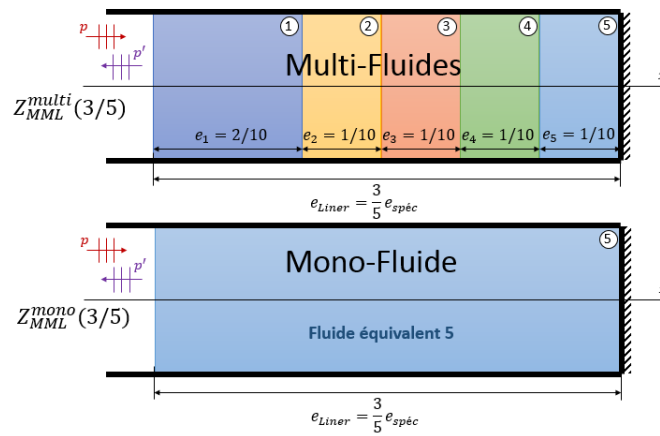


Figure 4-28 : Configurations MML multi_fluides équivalents ou propagation MML par un unique fluide équivalent (monofluide)

Au lieu d'un calcul de l'impédance équivalente passant par 5 milieux distincts, un seul fluide équivalent est simulé avec une épaisseur spécifique de 3/5. Cette différence de modélisation permet d'évaluer la déviation pouvant intervenir par l'utilisation de la méthode des matrices de transfert. En effet, dans la configuration monofluide, les matrices de transfert n'apparaissent pas, il s'agit d'une propagation d'onde acoustique dans un fluide équivalent dont les propriétés sont issues de l'échantillon d'un dixième d'épaisseur spécifique testé expérimentalement.

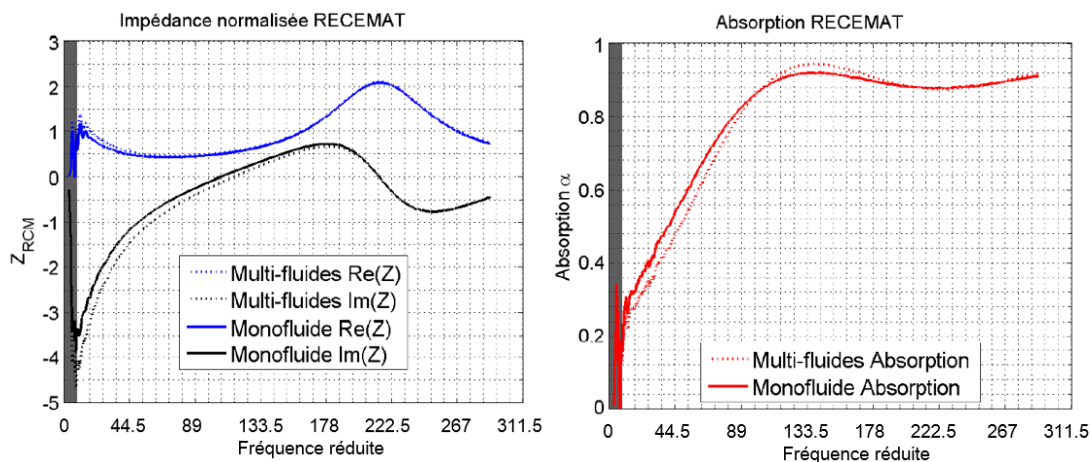


Figure 4-29 : Résultats d'impédance et d'absorption en propagation multi-fluides et monofluides

Les résultats présentés à la Figure 4-29 montrent un écart moyen inférieur à 5 % entre les deux types de modélisations. L'écart le plus marqué est situé aux basses fréquences, où la configuration multi-fluides prédit une réactance plus basse. Cette différence de réactance se traduit ensuite sur le calcul de l'absorption. Il est judicieux de limiter l'épaisseur d'un fluide équivalent pour calculer l'impédance d'un traitement fictif. Ce résultat est explicable par la méthode employée pour calculer les propriétés du fluide équivalent à partir des données expérimentales d'un échantillon. Une caractérisation complète des 5 paramètres du modèle de JCA, permettrait d'obtenir des résultats encore plus proches que ceux de la Figure 4-29. Dans le cas de calcul présenté ci-dessus, le modèle de Miki est utilisé pour obtenir le nombre d'onde du fluide équivalent. Le modèle de Miki est beaucoup moins performant dans le régime basse fréquence que les modèles JCA. L'erreur de détermination du nombre d'onde se répercute plus fortement lors de la propagation dans un fluide équivalent de grande épaisseur comme c'est le cas dans la modélisation monofluide. Cette mise en garde ayant été faite, les deux types de configurations donnent des résultats suffisamment proches pour être considérés comme équivalents. Il n'est donc pas nécessaire de théoriquement multiplier les domaines de fluides équivalents ou encore de fixer une limite d'épaisseur d'un domaine pour assurer une prédiction du matériau poreux.

4.4 Conclusion du chapitre

À travers le Chapitre 4, les différents outils de conception destinés à l'optimisation de microstructures acoustiques ont été détaillés. La démarche d'optimisation des deux types de traitements envisagés (réseaux de microcanaux et filamenteux ordonné) utilise les impédances cibles d'un traitement en conduit aval du moteur. Les codes AML et MML permettent d'obtenir l'impédance et l'absorption théorique d'un traitement acoustique contenant une ou plusieurs microstructures différentes. Une étude paramétrique complète sur le potentiel d'absorption des structures permet d'orienter la fabrication des échantillons vers les microstructures avec une absorption acoustique importante.

CHAPITRE 5 FABRICATION, CARACTÉRISATION MÉCANIQUE ET ACOUSTIQUE DE MATÉRIAU ACOUSTIQUE PAR FABRICATION ADDITIVE

Les possibilités de fabrication d'échantillons de microstructures ont été décrites à la Section 3.6. En parallèle, des modèles permettant de prédire le comportement acoustique de ces structures ont été évalués et modifiés pour être lié aux paramètres caractéristiques. Cette section vise maintenant à faire la jonction entre les modèles théoriques formulés et les fabrications réalisées. Ces résultats sont issus des échantillons produits jusqu'en Août 2015.

5.1 Matériaux acoustiques réalisés par fabrication additive

Un matériau a été employé et modifié pour générer des échantillons stables et testés tant sur le comportement acoustique que mécanique. Ce matériau se présente sous la forme d'une pâte thixotrope. La formulation et la procédure de préparation de la pâte, ainsi que la procédure de mise en forme ont été élaborées spécifiquement pour cette application.

5.1.1.1 Type de microstructure imprimées et préparation:

Afin d'évaluer le potentiel des procédés de fabrication additive dans la réalisation de microstructures acoustiques, différentes microstructures ont été générées pour étudier leur comportement acoustique. La structure OD présentée ci-dessous est celle ayant fait l'objet d'une modélisation et d'une caractérisation expérimentale du comportement acoustique. D'autres microstructures portant les noms OA, S30 et microcanaux ont également été testées.

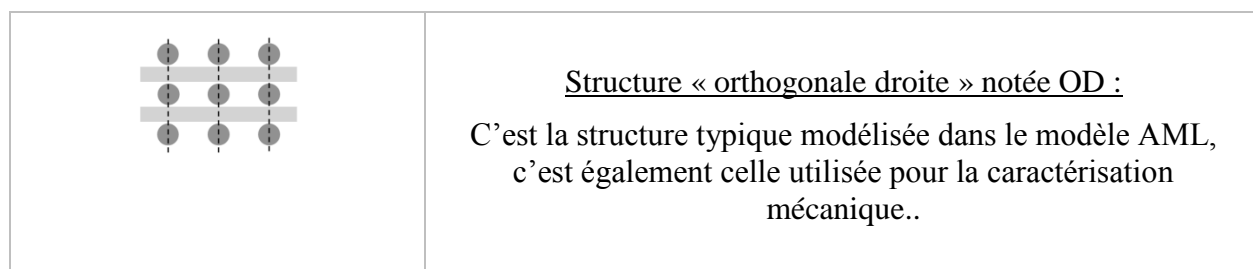


Figure 5-1 : Illustration Structure OD

Chaque structure fait l'objet d'un programme d'impression dédié. Ainsi lors du recouvrement de pli imprimé précédent le filament s'affaisse légèrement, l'épaisseur obtenue par l'impression d'une

couche de filaments n'est donc plus égale au diamètre du filament, l'épaisseur réelle est un paramètre ajusté pour chaque type de structure (voir Figure 5-2).

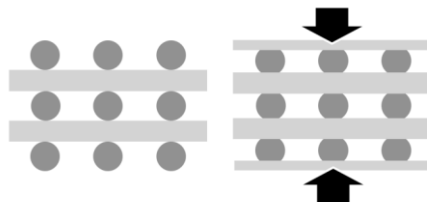


Figure 5-2 : Illustration du principe de densification du réseau réalisé par fabrication additive

Un fluage important de la microstructure a pu être observé lors de certaines impressions. La mise en repos de l'échantillon à basse température qui abaisse largement les propriétés du matériau imprimé et pas encore polymérisé peut aussi avoir un impact sur la microstructure.



Figure 5-3 : Échantillon mis en place dans le tube d'impédance

Lors de l'impression de ce matériau, la buse d'extrusion minimale pouvant être employée est de $0,625 D_{spéc}$. Ceci est une limitation à la taille de la microstructure qui peut être imprimée.

5.2 Comportement acoustique des échantillons générés par Écriture directe μ FDM

Dans cette première partie les valeurs d'impédance acoustique d'un matériau ainsi que son absorption mesurées par un tube d'impédance sont présentées. Les résultats expérimentaux sont directement comparés avec le comportement acoustique prédit par le modèle AML.

5.2.1 Prédiction AML versus résultats expérimentaux

Des échantillons issus de l'écriture directe μ FDM ont été réalisés avec différents paramètres de maille (Figure 5-4). Le diamètre de filament est quant à lui constant à $0,625 D_{spéc}$, ce qui correspond au diamètre minimal imprimable avec ce matériau. Les différents types de structures OD, OA, S30 et microcanaux ont également été imprimés.

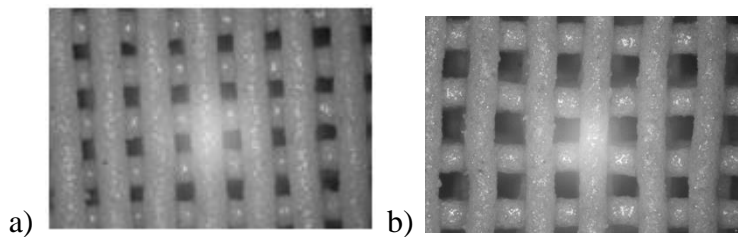


Figure 5-4 : Microstructure pour 2 paramètres de maille

Les échantillons présentent tous des épaisseurs différentes à l'exception des échantillons 10, 11 et 12 issus de la même impression. L'épaisseur des échantillons n'est pas un multiple du nombre de plis imprimés à cause de la densification du réseau lors de l'impression et du retrait de polymérisation. Par ailleurs certaines impressions n'ont pas données de résultats concluants, c'est le cas des échantillons 7, 9, 17 et 18 qui ne sont donc pas présentés (fluage de l'échantillon, défauts d'impression majeurs, porosité non communicante, etc...).

Les résultats des tests acoustiques effectués sur le tube d'impédance sont présentés dans cette section. Comme le montre la matrice des échantillons, les différents échantillons fabriqués ne font pas tous la même épaisseur. Pour confronter les résultats expérimentaux et les prédictions du modèle AML, la carte spécifique à l'épaisseur de l'échantillon est générée. De cette façon, en plaçant sur la carte l'échantillon fabriqué, on peut comparer l'indice global de performance donné par le modèle AML qui n'est autre que la moyenne de l'absorption sur la gamme de fréquence valide du tube d'impédance.

Les échantillons ont été testés dans les deux sens. Le sens 1 est défini par la mise en contact de la première couche de filament imprimée avec le fond du tube d'impédance, la dernière couche imprimée constitue donc la face apparente à l'onde incidente acoustique. Pour le sens deux, on retourne l'échantillon, la première couche imprimée (potentiellement écrasée) assure la face présentée au son. Les résultats en sens 1 sont un trait continu, les résultats en sens 2 sont en

pointillés. Enfin, des couleurs distinctes sont utilisées pour distinguer la prédiction du modèle AML et les résultats expérimentaux.

a) Échantillon 10

L'échantillon 10 est une structure OD de paramètre $a = 2,5 D_{spéc}$. Elle possède donc une forte porosité théorique de plus de 80%, la porosité réelle est en revanche de 70% lié à la densification du réseau lors de l'impression. La Figure 5-5 montre que le modèle prédit avec justesse l'impédance complexe de l'échantillon sur toute la plage des fréquences mesurées, ainsi que l'absorption jusqu'à 222,5 kr. On remarque que pour cet échantillon, les propriétés sont les mêmes dans les deux sens de placement de l'échantillon. En effet, la face collée au substrat n'a pas été écrasée et on garde donc la même microstructure homogène dans tout l'échantillon.

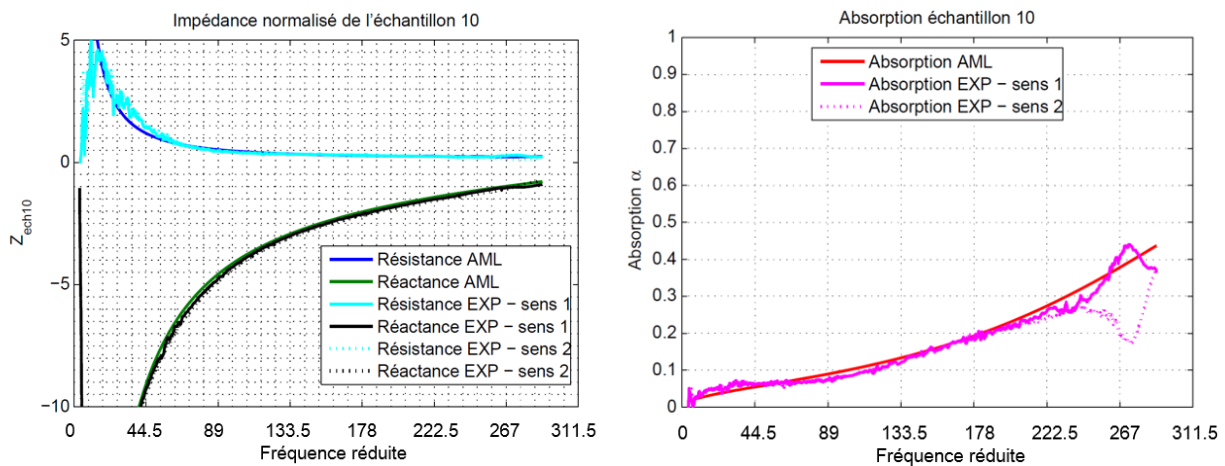


Figure 5-5 : Impédance et absorption acoustique théoriques et mesurées de l'échantillon 10

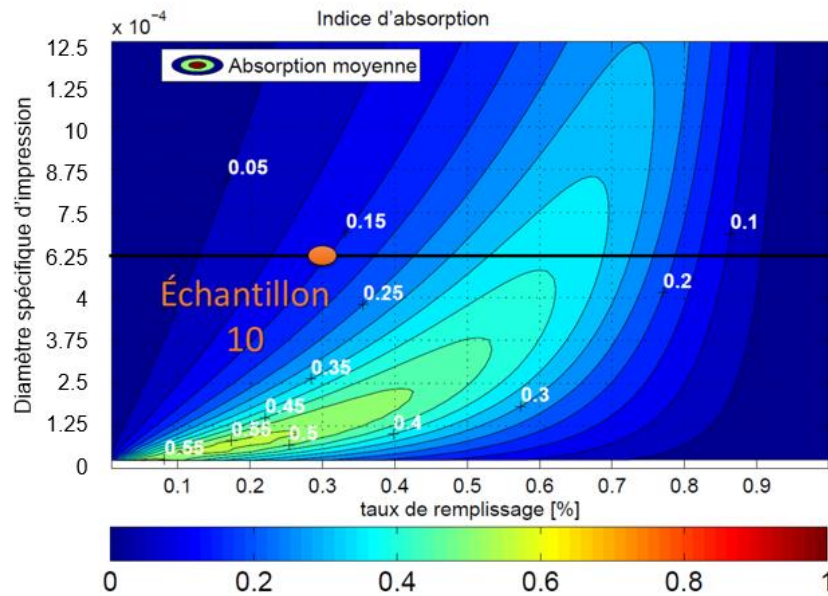


Figure 5-6 : Indice de performance théorique (modèle AML), positionnement de l'échantillon 10

L'indice de performance théorique de cette structure est bas ($I_G = 0,15$) car elle possède une faible résistivité au passage de l'air qui entraîne une interaction limitée entre l'onde acoustique et le réseau. L'indice de performance mesuré est de 0,143 ce qui montre la capacité du modèle à prédire la pertinence des structures imprimées. L'impédance dans les sens 1 et 2 est identique ce qui montre une structure très régulière sans couche résistive de surface ou inhomogénéité importante au sein de la structure.

b) Échantillon 4

L'échantillon 4 possède le même type de structure que l'échantillon 10 mais avec un paramètre de maille très resserré de $1,5 D_{spéc}$, sa porosité est donc beaucoup plus faible, de l'ordre de 50%. Ces caractéristiques acoustiques expérimentales et issues du modèle AML sont présentées à la Figure 5-7.

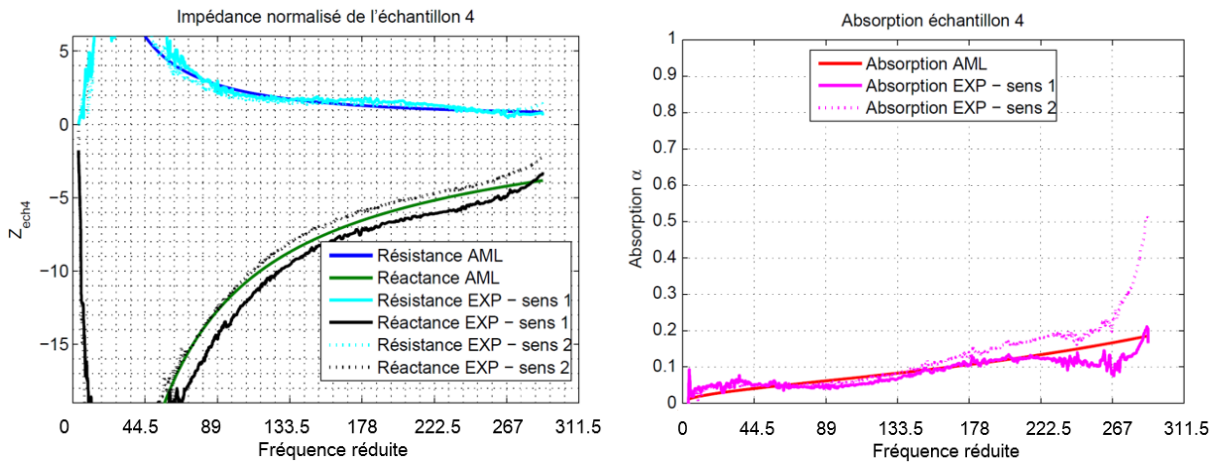


Figure 5-7 : Impédance et absorption acoustique théoriques et mesurées de l'échantillon 4

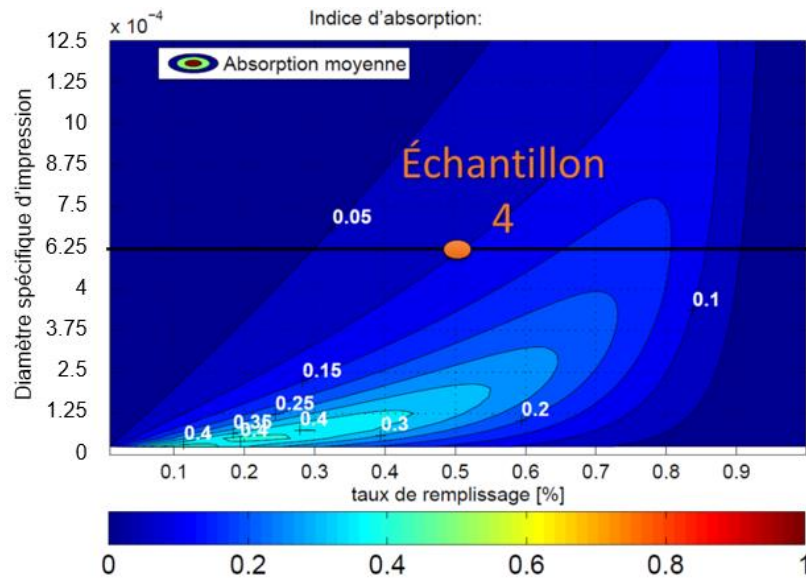


Figure 5-8 : Indice de performance théorique (modèle AML), positionnement de l'échantillon 4

L'indice de performance théorique de cette structure est bas ($I_G = 0,10$) comme montré à la Figure 5-8. Cependant, les résultats acoustiques de cet échantillon sont difficiles à interpréter car l'échantillon réalisé est de faible épaisseur. De plus, la densification de l'échantillon couplée aux pores resserrés lui confère une partie réelle de son impédance très élevée ce qui limite la pénétration de l'onde au sein du réseau. Des tests supplémentaires utilisant des épaisseurs plus élevées doivent permettre d'observer le comportement réel de la microstructure. Il est donc inutile de générer des échantillons de faible épaisseur sauf si l'on souhaite s'en servir comme couche résistive de surface.

Il est préférable de produire des échantillons de $2/10 e_{spéc}$ ou plus pour extraire les propriétés de fluide équivalent de la microstructure.

c) Échantillon 13

L'échantillon 13 est de structure OD avec un paramètre de maille a intermédiaire vis-à-vis des deux échantillons présentés précédemment de $2 D_{spéc}$ (n°4 : $a = 1,5 D_{spéc}$ et n°10 : $a = 2,5 D_{spéc}$).

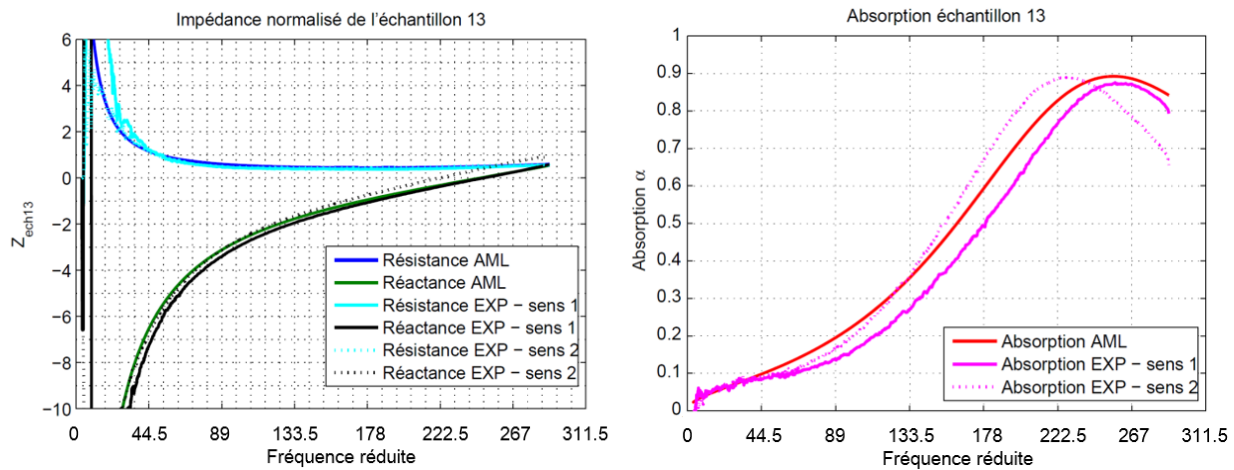


Figure 5-9 : Impédance et absorption acoustiques théoriques et mesurées de l'échantillon 13

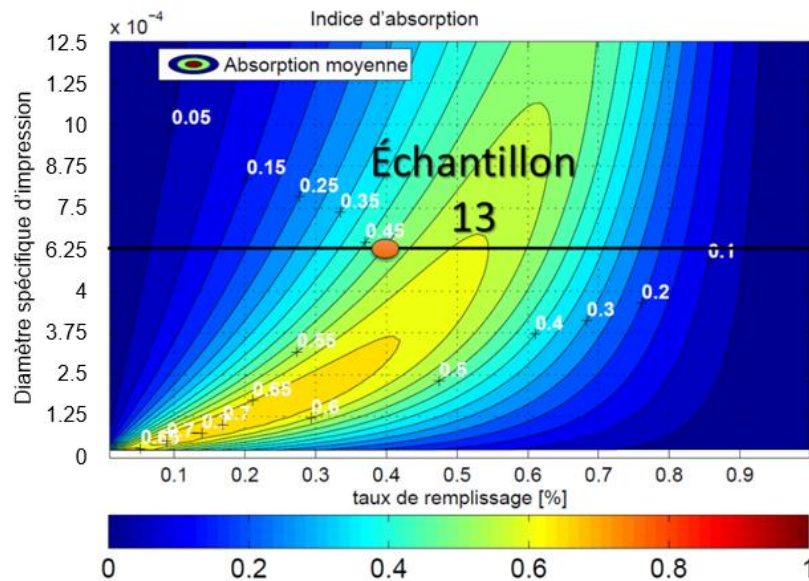


Figure 5-10 : Indice de performance théorique (modèle AML), positionnement de l'échantillon 13

L'échantillon 13 est un des échantillons les plus pertinents imprimés à l'heure actuelle, son indice de performance théorique étant de 0,47 comme illustré sur la Figure 5-10. Les mesures expérimentales donnent une absorption moyenne sur la gamme [8,9 kr; 289 kr] de 0,48 ce qui est très proche des prédictions du modèle. La prédiction de l'impédance complexe est juste et l'absorption par le modèle AML est très proche des résultats expérimentaux. La face collée sur le substrat d'impression possède un taux d'ouverture à l'onde acoustique beaucoup plus faible que la face en sens 1. Cette inhomogénéité peut expliquer une partie des différences de résultats entre l'impédance du matériau en sens 1 et 2. En effet, la couche imprimée aplatie servant de *facing* agit comme une plaque résistive à l'introduction de l'onde au sein du milieu poreux. On peut imaginer que sans cette densification de surface liée au début de l'impression on obtiendrait une impédance expérimentale encore plus proche du modèle à la Figure 5-9.

d) Échantillon 16

Les résultats du seul échantillon testé et viable de structure OA est présenté ici.

Cette structure à filaments alternés possède un paramètre de maille $a = 2,5 D_{spéc}$. Le modèle AML a été adapté pour prendre en compte la tortuosité différente du milieu et sa résistivité au passage de l'air. Les expressions de la résistivité et de la tortuosité sont issues de Tarnow, 1996.

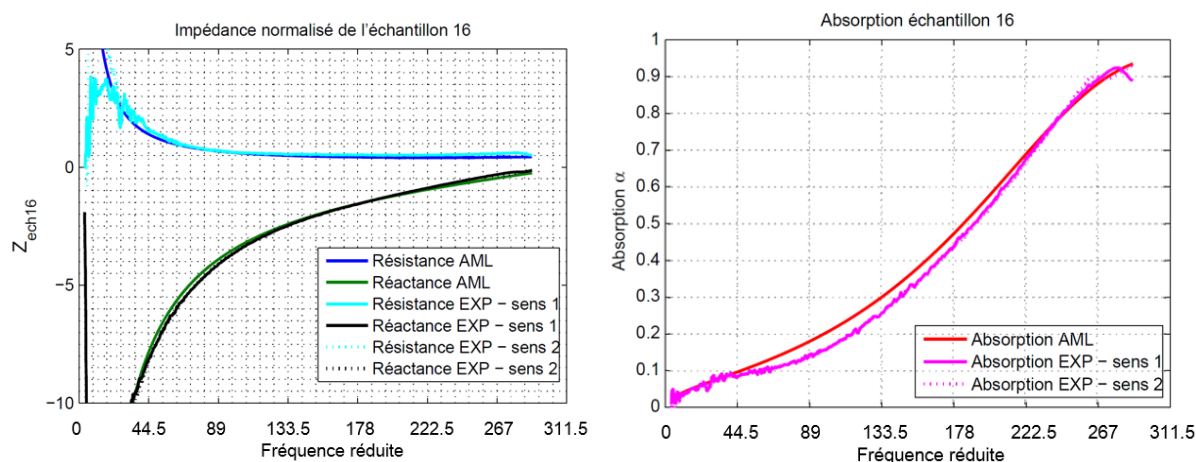


Figure 5-11 : Impédance et absorption acoustique théoriques et mesurées de l'échantillon 16

Les résultats expérimentaux montrent tout d'abord une très faible variabilité entre les deux sens de tests de l'échantillon, ce qui peut indiquer que la microstructure est relativement uniforme dans l'échantillon. Les modifications introduites pour prendre en compte l'architecture OA semble

également fonctionner correctement car la prédiction de l'absorption concorde avec celle observée au sein du tube de Kundt. En revanche la performance de ce réseau est limitée, la partie réelle de l'impédance est basse. Une solution envisagée pour augmenter la dissipation est de resserrer les filaments en diminuant le paramètre de maille.

5.2.2 Reproductibilité d'échantillons et influence de l'impression

a) Impression commune

Les échantillons 10,11 et 12 ont été réalisés lors d'une même impression. La microstructure de ces échantillons est donc commune, leur épaisseur est également identique.

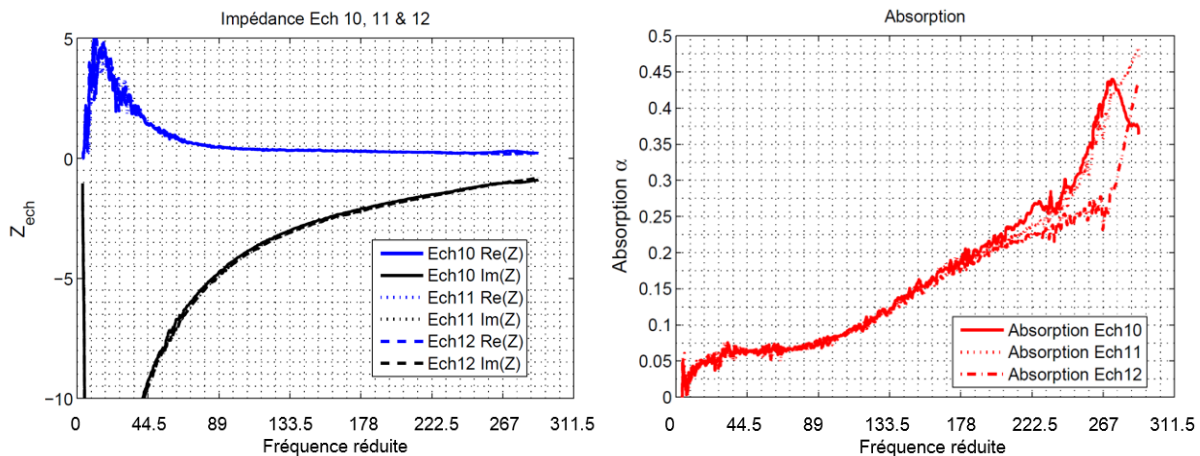


Figure 5-12 : Comparaison des échantillons 10, 11 et 12

Les impédances expérimentales des 3 échantillons sont extrêmement proches sur l'ensemble du domaine fréquentiel. Ils se distinguent seulement au dessus de 250 kr et entraînent une absorption très variable. Cette variation peut être liée aux défauts locaux dans les échantillons. Ces résultats montrent que l'on peut obtenir une surface acoustique homogène en surface. Les échantillons ont en effet été découpés des zones distinctes mais possèdent la même impédance. Il est maintenant pertinent de se demander si la constante de production peut être obtenue entre deux impression distinctes.

b) Impressions distinctes

Les échantillons 13 et 14 possèdent les mêmes paramètres de microstructures. Ils ont cependant été fabriqués séparément lors de séances d'impressions distinctes. Leurs seules distinctions sont donc une épaisseur légèrement différente (de 6%) et les possibles défauts introduits dans la microstructure lors de la déposition des filaments.

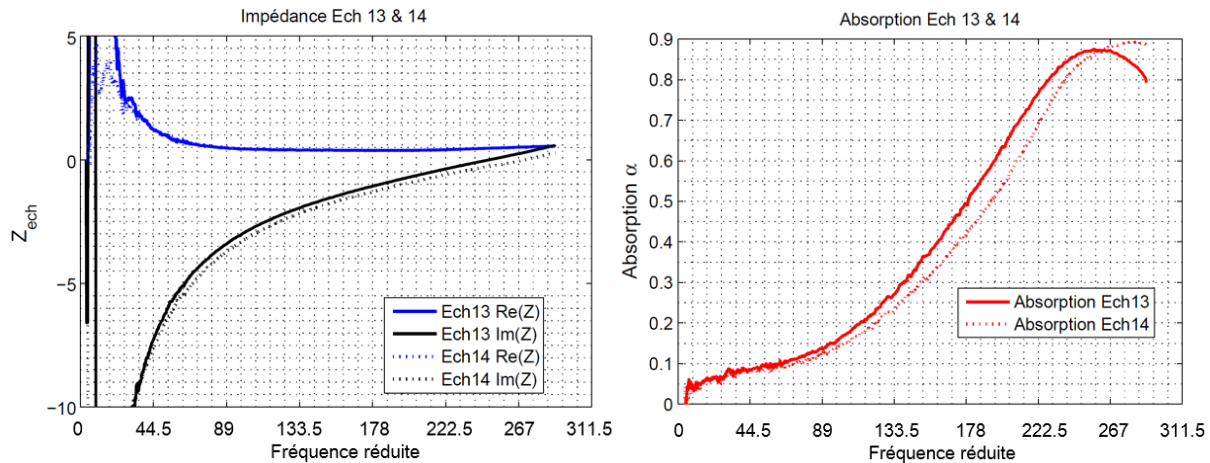


Figure 5-13 : Comparaison des échantillons 13 & 14

La Figure 5-13 montre que la production distincte de ces deux échantillons donne des résultats acoustiques très proches. La partie réelle de l'impédance est la même pour les deux échantillons à partir de 35,6 kr. Seule, la réactance se distingue faiblement ($0,2 \rho_0 c_0$ d'écart) mais cette différenciation est largement expliquée par l'épaisseur supérieure de 6% de l'échantillon 13.

Sur la base de ces tests, les propriétés acoustiques des échantillons générés ont été analysées et montrent une concordance importante avec les prédictions du modèle AML. Par ailleurs, la comparaison de différents échantillons a permis de montrer qu'un traitement avec une surface acoustique homogène peut être fabriqué et qu'il est également possible de reproduire des propriétés acoustiques si l'on conserve la microstructure définie. Une première extension du modèle AML a également permis de prédire le comportement de la structure OA. Des travaux d'extensions des microstructures prises en compte par le modèle pourront donc être investigués.

Le contrôle de la microstructure réalisée permet donc de déterminer précisément l'impédance acoustique du traitement et permet donc de s'adapter à une cible spécifique.

5.2.3 Prédiction du comportement acoustique de multicouches

Grâce au modèle MML basé sur la méthode des matrices de transfert, on peut prédire le comportement de revêtements acoustiques multicouches. Le comportement acoustique de traitements multicouches faisant intervenir différentes microstructures dans l'épaisseur est discuté dans cette section. La Figure 5-14 illustre un exemple d'empilement avec quatre matériaux de microstructures différentes. Plusieurs configurations ont été testées et les résultats comparés aux valeurs théoriques.

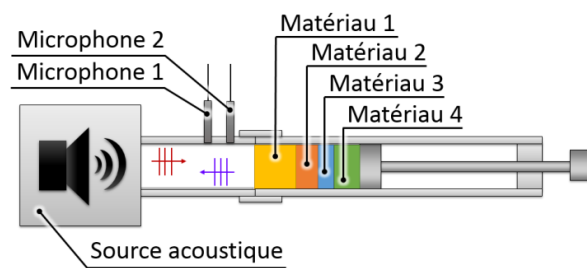


Figure 5-14 - Tube d'impédance avec quatre échantillons empilés

a) Configurations 22 et 29 : Inversion d'emplacement d'échantillons

Les configurations 22 et 29 utilisent les mêmes échantillons qui ont la même structure OD avec un paramètre de maille $a = 2 D_{spéc}$. Le but de ces tests est d'étudier le comportement acoustique de ce type de microstructure mais d'une épaisseur supérieure à $2/5 e_{spéc}$. Il permet également de voir si les gradients de propriétés observés lors des tests sur échantillons seuls (i.e effet du sens de la mesure) influence la prédiction réalisée par le modèle MML. Les deux configurations sont illustrées sur la Figure 5-15 et la Figure 5-17.

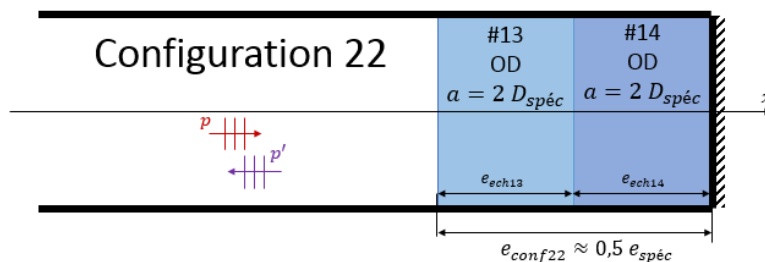


Figure 5-15 : Configuration 22

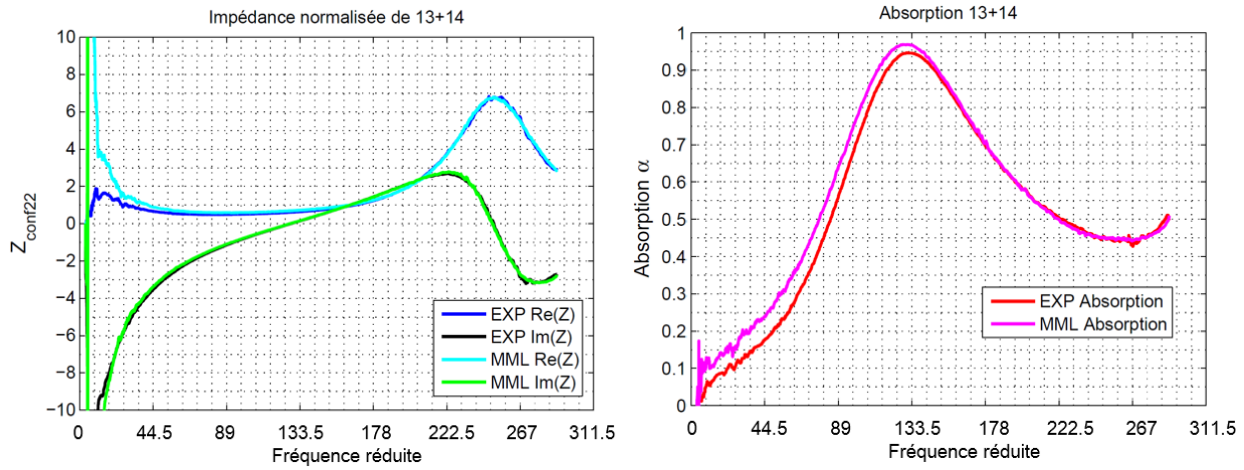


Figure 5-16 : Impédance et absorption acoustique de configuration 22

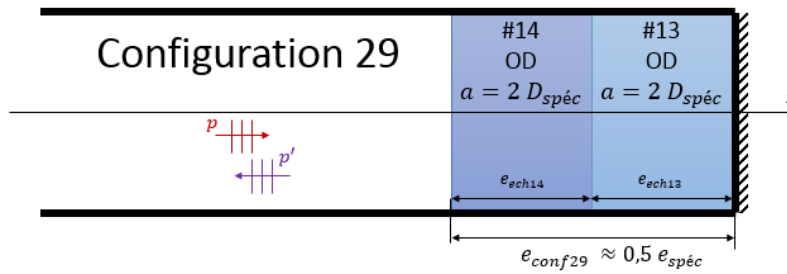


Figure 5-17 : Configuration 29

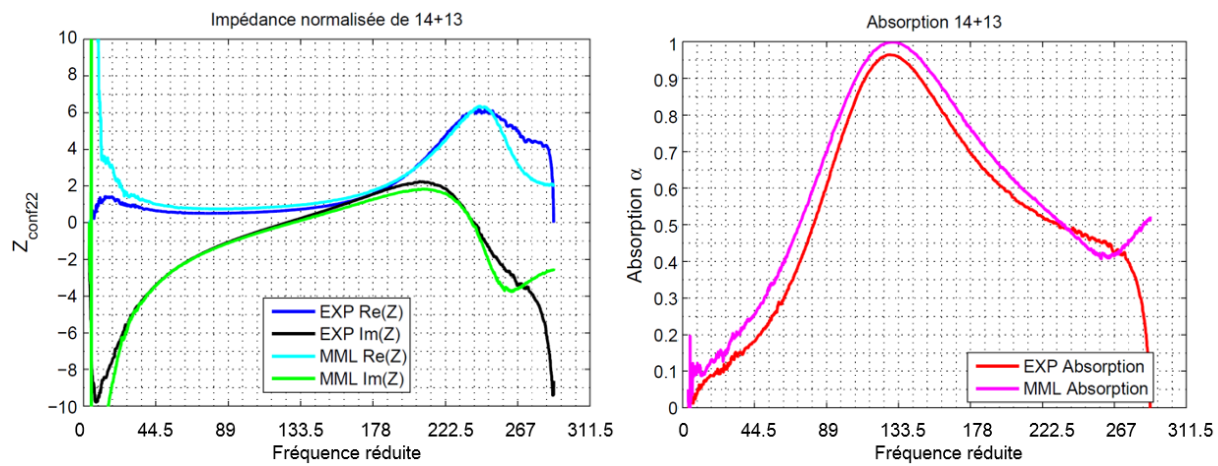


Figure 5-18 : Impédance et absorption acoustique de configuration 29

Dans les deux configurations, une forte augmentation de la résistance acoustique du traitement, associée à une chute importante de sa réactance, est observée pour des fréquences supérieures à

180 kr, donnant une absorption limitée en haute fréquence. Par contre, on remarque aussi l'augmentation significative de l'absorption en moyenne fréquence [60 kr; 160 kr].

Pour les deux configurations, le modèle MML qui extrait les propriétés des fluides équivalents de chacun des échantillons puis les propagent selon la configuration demandée donne le bon comportement acoustique. Il suit en effet assez fidèlement ($\pm 5\%$) les variations de la résistance et réactance acoustique. Il est donc possible de s'appuyer sur des simulations de configurations du modèle MML pour optimiser un traitement comportant différentes microstructures réalisées en fabrication additive ou avec des matériaux autres. Un décrochage de la fiabilité de la précision est visible sur la configuration 29 pour des fréquences supérieures à 250 kr ce qui peut être attribué aux défauts d'impression dans la microstructure des échantillons ayant un effet plus important aux hautes fréquences. Le *facing* d'impression présent sur l'échantillon 13 ne semble pas empêcher une bonne prédiction du comportement du traitement. Ce phénomène peut s'expliquer par l'extraction des propriétés du fluide équivalent issu des tests expérimentaux des échantillons seuls dans lesquels le *facing* était déjà présent.

b) Configuration 23: Gradient de propriétés dans l'épaisseur

La configuration 23 fait intervenir 4 échantillons ayant la même structure mais 2 paramètres de maille différents (Figure 5-19). On crée ainsi un milieu moins résistif servant majoritairement de réactance à l'arrière des échantillons 13 et 14 qui possèdent une plus grande résistivité. L'autre avantage de cette structure est de simuler un traitement acoustique de plus forte épaisseur

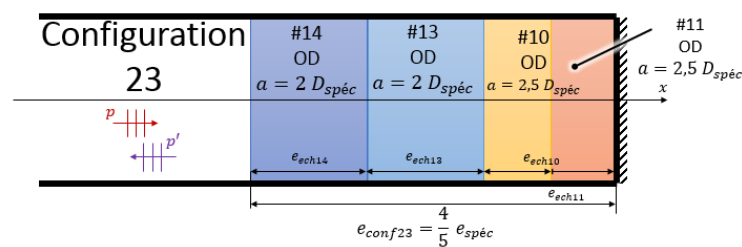


Figure 5-19 : Configuration 23

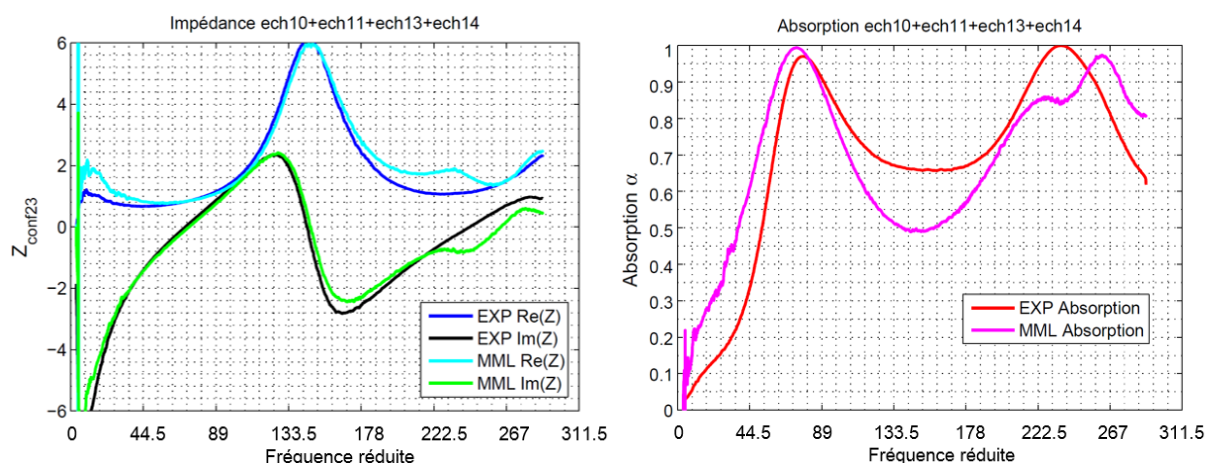


Figure 5-20 : Impédance et absorption acoustique de configuration 23

D'après les résultats obtenus par le modèle AML vis-à-vis de l'expérimental pour la configuration 23 (cf Figure 5-20), la prédiction du comportement de microstructures de forte épaisseur est possible. Les écarts observés entre le modèle et les résultats expérimentaux peuvent en effet être largement attribués aux défauts de chacun des échantillons.

À la vue des résultats montrés dans cette section, il apparaît que l'on peut prédire le comportement général des échantillons grâce à l'utilisation du model AML. La production d'échantillons supplémentaires d'épaisseur supérieure et intégrant des variations de la structure selon l'épaisseur devrait venir étayer les observations actuelles.

5.2.4 Synthèse des résultats acoustiques

Les tests réalisés grâce au tube d'impédance permettent de mettre en confrontation les modèles de prédiction développés avec le comportement acoustique sous incidence de microstructure. Dans l'attente d'échantillons supplémentaires, les expériences menées montrent que le modèle AML permet de prédire l'indice de performance d'une microstructure donnée. En revanche des travaux d'approfondissement doivent être menés pour prédire plus précisément les fluctuations observés sur l'absorption des matériaux du type OD. Le modèle AML pourra être utilisé pour optimiser les prochaines structures acoustiques. Concernant les autres structures, le modèle AML nécessitent d'être adaptés car les autres structures (S30 et OA) qui doivent permettre une dissipation plus importante de l'onde acoustique ne suivent pas les mêmes lois de tortuosité et de résistivité au passage de l'air. Ces lois devront être déterminées pour obtenir la même qualité de prédiction que

pour les structures OD. Par ailleurs, la corrélation entre les résultats expérimentaux et théoriques permet de valider la qualité des échantillons imprimés. En effet une hétérogénéité dans la structure et/ou des gradients de propriété donne des résultats se traduisant par une différence d'impédance. Ces hétérogénéités limitent l'application du modèle AML aux échantillons possédant des propriétés uniformes. Le modèle MML permet bien de calculer l'impédance d'un empilement de différents matériaux acoustiques. Il peut être utilisé pour tous types de matériaux acoustiques, classiques ou générés par les procédés de fabrication additive, tant que ces derniers possèdent une structure uniforme et homogène dans l'épaisseur.

5.3 Comportement mécanique

Des tests mécaniques ont été pratiqués pour connaître les propriétés de ce type de structure.

Les échantillons de tests mécaniques sont de 100 x 40 mm pour les tests de flexion et de compression et ont une épaisseur d'un quart d'épaisseur spécifique du traitement.

5.3.1 Définition de la composition des échantillons

Les échantillons mécaniques prendront donc la forme d'un sandwich composite symétrique constitué de peaux carbone avec âme poreuse à structure ordonnée, dénommée AM.

5.3.2 Tests de compression

Les tests de compression ont été réalisés sur des éprouvettes dont les dimensions sont données dans le Tableau 5-1. A titre d'exemple, la Figure 5-21 illustre un échantillon destiné à la compression avec âme.

Tableau 5-1 : Dimensions des échantillons de compression

Échantillon	l	L	$e_{spéc}$
1	12,4	48,6	0.32
2	13,1	45,5	0.34
3	13,7	53,1	0.32
4	13,3	53,0	0.34

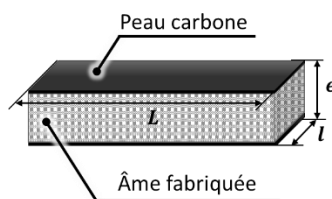


Figure 5-21 : Photographie d'un échantillon de compression

La vitesse de mandrin adoptée pour les tests de compression est de $1\text{mm}/\text{min}$. L'essai de compression s'effectue par un contrôle en déplacement de la colonne. Une cellule de charge vient capter avec une fréquence d'échantillonnage de 10Hz , l'effort appliqué sur le matériau.

Les échantillons ont été filmés lors de la compression pour observer les déformations de la structure au cours du chargement.

Un chronogramme des états observés de l'échantillon a été réalisé, on présente les états $\varepsilon = 0\%$ et

$\varepsilon = 9\%$ avec ε le taux de déformation : $\varepsilon = \Delta e / e$.

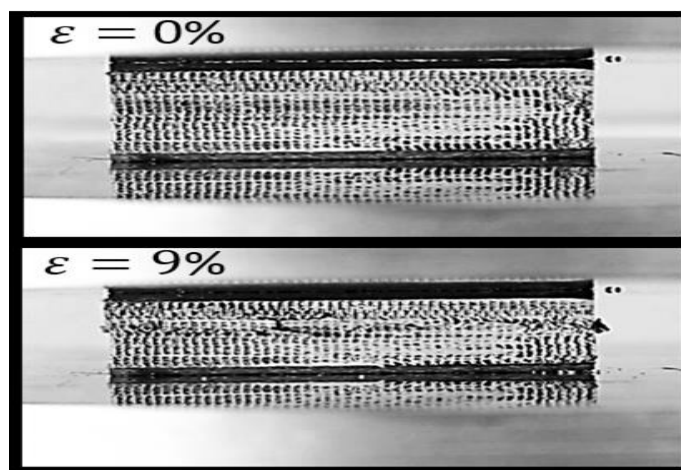


Figure 5-22 : Historique d'un essai de compression de structure sandwich à âme en matériau imprimé par fabrication additive

Ce chronogramme, représentatif de l'ensemble des échantillons testés, montre que dans un premier temps, la structure s'écrase de façon quasi-uniforme. À 9% de déformation, la structure cède sur une couche complète de l'âme marquant la fin de l'intégrité du réseau. Une densification progressive du réseau est ensuite observée permettant à la structure de continuer à reprendre la charge qui lui est appliquée. Cette analyse est d'ailleurs confirmée par la courbe contrainte-

déformation à la Figure 5-23. On peut observer que la contrainte maximale n'est pas atteinte lors de la première rupture à $\varepsilon = 2\%$. Un premier pli de la structure cède mais le reste du matériau continue à reprendre les efforts de compression. Ce comportement est typique des matériaux poreux. La contrainte en compression est normalisée par la limite élastique du matériau de référence utilisé pour les essais mécaniques.

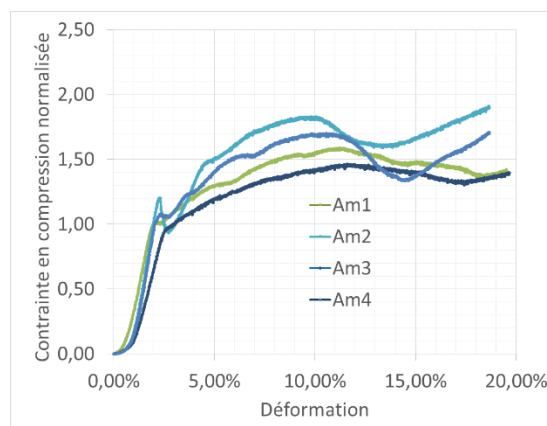


Figure 5-23 : Courbes de compression en contrainte déformation des échantillons

La contrainte maximale à la rupture observée pour les échantillons est de 1.

En fait, sa contrainte continue d'augmenter jusqu'à une déformation de près de 10% lors de la densification du réseau poreux.

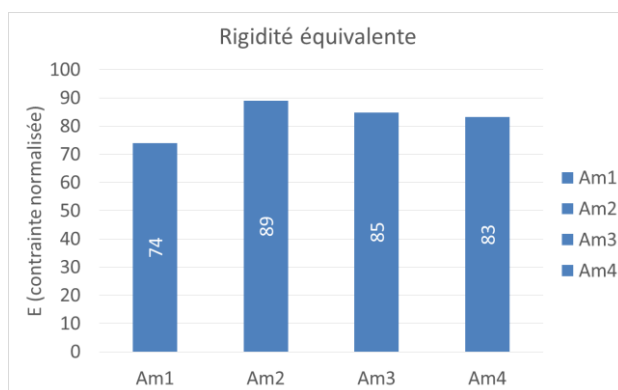


Figure 5-24 : Rigidité équivalente obtenues lors des essais de compression

La rigidité équivalente de compression obtenue pour les échantillons AM est de 82,7 fois la contrainte normalisée. On observe une dispersion des résultats de l'ordre de 15%, cet écart peut être expliqué par les différences d'impression entre les échantillons mais aussi par la qualité

variable de l'interface entre l'âme et les peaux. Les peaux de carbone en tissu pré-imprégné ont été réalisées dans un premier temps, alors que l'âme a été produite seule sur la station de micro fabrication additive. La mise en commun des peaux carbonées et des âmes se fait par l'application d'un film de colle et une cuisson du sandwich. L'interface s'est montrée bien moins résistante (rupture adhésive au interfaces avant rupture de l'âme du sandwich) que dans le cas de la production classique. Cette dernière solution d'assemblage n'a toutefois pas été retenue pour nos besoins. Une méthode de fabrication mieux adaptée sera par la suite mise en œuvre pour les tests d'impact de façon à améliorer l'interface peau/âme.

5.3.3 Tests de flexion 3 points

Des tests de flexion ont été réalisés sur des échantillons de matériau obtenus par fabrication additive.

La vitesse d'avancement adoptée pour les tests de flexion est de $1\text{mm}/\text{min}$. L'essai de compression s'effectue par un contrôle en déplacement de la colonne. Une cellule de charge vient capter avec une fréquence d'échantillonnage de 10Hz l'effort appliqué sur le matériau. Le protocole de test est inspiré de la norme ASTM D7250.

Les éprouvettes sont testées dans deux configurations de flexion 3 points différentes afin de permettre la prédire du module de cisaillement de l'âme de l'échantillon sandwich testé.

Le but de ces essais est d'observer le comportement à la rupture des échantillons pour voir s'ils possèdent un comportement fragile en traction/cisaillement (partie inférieure de l'éprouvette soumise à la flexion).

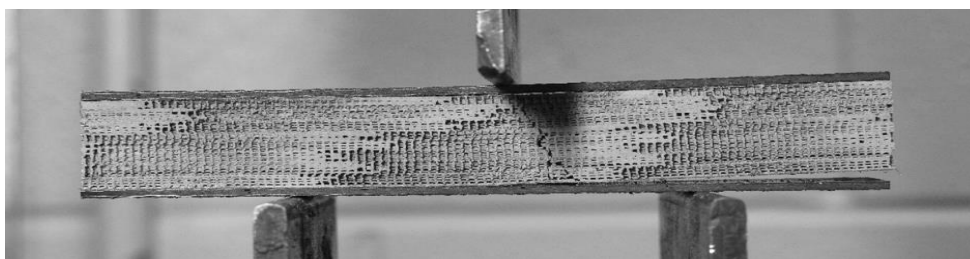


Figure 5-25 : Éprouvette de test de flexion

Les échantillons ont été soumis à une précharge de 10N puis une mise en contrainte avec un écartement de 60 mm puis 80 mm afin de pouvoir déduire le module de cisaillement de l'âme. Le

module de cisaillement a été évalué à $G = 11,8$ (*contrainte normalisée*). En revanche il n'a pas été possible d'évaluer le module de flexion à cause de la rupture prématurée des interfaces entre l'âme et les peaux carbonées. Lors des tests de flexion, on obtient une rupture de la microstructure (filaments) avec propagation de fissure dans l'âme de l'échantillon est obtenue. Les tests de flexion réalisés n'ont pas permis d'obtenir la totalité des informations voulues, des tests subséquents devront venir corroborer les résultats énoncés.

5.3.4 Analyse générale des tests réalisés

L'ensemble des essais réalisés montre des propriétés intéressantes tant sur le plan mécanique qu'acoustique. Des tests viendront compléter prochainement les essais mécaniques, mais le comportement observé en compression semble indiquer qu'une dissipation d'énergie intéressante est possible lors de la déformation du réseau. Le module d'Young en compression avec le matériau est de 82,7 fois la contrainte normalisée de référence, une résistance à la compression identique au matériau de référence est relevée. Les tests de flexion ont permis la détermination du module de cisaillement du matériau à 11,8 fois la contrainte de référence.

La confrontation régulière des modèles analytiques et numériques tant mécaniques, qu'acoustique, est essentiel dans le développement de structure additive car ces procédés possèdent des variables différentes des procédés classiques et donc des sources d'erreurs ou de perturbations diverses. Les premiers tests mécaniques réalisés permettent de montrer l'importance de la qualité des interfaces entre l'âme poreuse et les peaux composites.

CHAPITRE 6 TRAVAUX FUTURS

Les travaux menés lors de ce projet ouvrent de nouvelles perspectives. La micro fabrication additive montre qu'elle est capable de générer des échantillons viables pour une caractérisation complète acoustique et mécanique d'une microstructure contrôlée et prédictible. La génération de structure à haute porosité est envisageable et plusieurs procédés doivent être surveillés et investigués pour connaître les nouvelles possibilités de matériaux acoustiques. Il sera par exemple intéressant de poursuivre le développement du procédé à cire sacrificielle et imprégnation gravitaire. Le procédé d'impression directe de polymères thermodurcissables présente, quant à lui, une bonne opportunité pour satisfaire aux exigences des traitements acoustiques. Néanmoins, la limitation actuelle liée au matériau étudié, d'impression de filaments de $0,625 D_{spéc}$ réduit les possibilités d'optimisation de structures acoustiques. L'utilisation d'un matériau optimisé doit permettre de passer à des impressions de $0,375$ et $0,25 D_{spéc}$ qui selon les modèles présentés dans ce mémoire bénéficient d'une absorption acoustique bien meilleure pour une même épaisseur. Par ailleurs la standardisation des échantillons générés à une épaisseur de $1/5 e_{spéc}$ est recommandable pour la lisibilité des résultats et la précision de l'éduction des propriétés du fluide équivalent à la microstructure ordonnée.

Des tests mécaniques ont été entrepris et confirment le potentiel de création de structures avec une tenue structurelle et une absorption acoustique par procédé de fabrication additive. En revanche, la production plus rapide et plus stable des échantillons doit également être investiguée pour accélérer les tests acoustiques, mécaniques ou d'autres tests complémentaires. Il sera ainsi possible d'explorer davantage l'intégrabilité du traitement.

La réalisation d'une plus large palette d'échantillon doit aussi permettre de consolider et élargir les résultats obtenus. Une exploration plus large des cartes d'indices de performances peut permettre de vérifier l'acuité du modèle AML. Le temps du projet n'a pas permis l'étude plus approfondie des gradients de propriété sur le comportement acoustique. De même, les défauts d'impression ont fait l'objet de certains essais mais une analyse plus précise est nécessaire pour connaître la fréquence d'apparition de défauts acceptable. Une étude paramétrique sur l'association de multiples matériaux et avec des épaisseurs variables peut être menée par l'intermédiaire du modèle MML pour optimiser l'évolution de la microstructure en fonction de l'épaisseur.

La création d'échantillons pouvant être testés en soufflerie acoustique présentent également un fort intérêt pour explorer les phénomènes physiques associés aux matériaux à réaction non-localisée. En effet, l'impédance de surface en incidence normale n'est pas suffisante pour connaître le comportement complet d'un matériau à réaction non-localisée comme c'est le cas pour les microstructures poreuses étudiées ici. La caractérisation des 5 paramètres de Biot de la section 1.7.2 et des tests aéroacoustiques permettant d'observer l'interaction du milieu poreux avec un écoulement rasant permettra d'approfondir la caractérisation du revêtement acoustique pour des conditions de fonctionnement plus représentative.

La mise en œuvre de modèles de prédiction du comportement acoustique des matériaux poreux donne aux laboratoires de nouvelles opportunités de partenariats et d'échanges de connaissances. Associé à la fabrication additive, cette démarche de conception de matériau poreux permet la création de tout nouveaux matériaux pouvant avoir des applications fonctionnelles multiples, acoustiques, vibratoires, mécaniques ou encore thermiques.

Plus généralement, la démarche proposée dans ce mémoire liant acoustique, fabrication additive et matériaux composites possède un potentiel d'innovation fort et pourrait mener à des applications dans des domaines tels que le transport, l'énergie ou encore le bâtiment.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

Le but de cette maîtrise était d'étudier de nouveaux matériaux pour la réalisation de structures acoustiques destinées à la réduction du bruit des turbosoufflantes.

Une étude des contraintes d'intégration de ce type de matériaux dans un moteur d'avion désigné a permis de définir les requis fonctionnels du futur traitement acoustique. Durant ce projet, des matériaux acoustiques commerciaux ont été sélectionnés et commandés, et une exploration intensive des procédés de génération de matériaux poreux stochastiques a été menée. De plus, des tentatives de génération de mousse nouvelles ont été réalisées.

Dans une démarche innovante et spécifique à l'intégration aéronautique, la fabrication additive est choisie pour réaliser de nouvelles structures acoustiques. Les procédés de fabrication additive ont fait l'objet d'une évaluation afin de connaître leur pertinence pour générer des microstructures poreuses ordonnées. Trois procédés de micro-fabrication additive ont été testés pour créer des échantillons de matériaux acoustiques poreux du type micro-treillis ou du type réseau de micro-canaux. Le procédé d'écriture directe de polymères thermodurcissable a permis de fabriquer des échantillons de caractérisation acoustique et mécanique. On a ainsi pu créer une structure ordonnée tridimensionnelle poreuse. Cette structure unique est constitué d'un matériau donc on contrôle la microstructure pour obtenir les propriétés mécaniques et acoustiques requis pour une intégration aéronautique.

En parallèle de ces recherches sur les procédés de fabrication, des travaux de modélisations acoustiques de structures ordonnées filamenteuses et de microcanaux ont permis de prédire le comportement des échantillons fabriqués durant ce projet. Il est ainsi possible d'optimiser la microstructure imprimée pour maximiser l'efficacité acoustique et mécanique du traitement acoustique. Un ensemble de codes informatiques a été développé et implanté au laboratoire LAVA, permettant la prédiction et l'analyse des phénomènes acoustiques intervenant dans des réseaux de microcanaux et des réseaux filamenteux tridimensionnels ordonnés. Ces modèles sont basés sur le modèle de Zwikker-Kosten pour la propagation en microcanaux et sur les modèles JCA (Johnson-Champoux-Allard) associés aux travaux sur les cristaux soniques de Guild. Les modèles de la littérature ont été adaptés pour permettre de lier les paramètres de fabrication additive au

comportement acoustique pour permettre l'étude et l'optimisation de structures uniques. Ainsi, différentes microstructures imprimables ont été imaginées et réalisées.

Le modèle AML (*Additive Micro-Lattice*) calcule ainsi les propriétés du fluide équivalent acoustique d'une microstructure tridimensionnelle ordonnée et donne son impédance et absorption acoustique. Il a été utilisé pour une analyse paramétrique menant à de nouvelles cartes de performances qui indiquent la morphologie acoustique optimale selon la fréquence d'atténuation ciblée. Cet outil a été confronté aux résultats expérimentaux au tube de Kundt des échantillons produits. Sur les cas d'étude, le modèle AML permet de prédire dans un intervalle de $\pm 5\%$ l'absorption moyenne d'un traitement et de donner la courbe d'impédance normalisée sur toute la plage de mesure du tube d'impédance à l'intérieur de $\pm 0,5\rho_0 c_0$ si la structure additive ne possède pas de défauts d'impression important.

Le modèle MML (*Multi-Materials Liners*) autorise l'optimisation de traitements acoustiques à gradient de propriétés dans l'épaisseur ou faisant intervenir différents éléments et/ou matériaux. Il emploie indifféremment les résultats expérimentaux d'un tube d'impédance ou les paramètres de Biot pour obtenir et associer différents fluides équivalents et donner l'impédance de surface du traitement. Il permet ainsi de simuler des revêtements acoustiques avec plusieurs matériaux ou d'étudier l'impact de l'assemblage de différentes microstructures sur l'impédance acoustique. La création de configurations associant différentes microstructures a permis de montrer que le modèle MML donne l'allure générale de l'impédance acoustique.

Une campagne de tests acoustiques sur des échantillons fabriqués au laboratoire LM2 a montré que la création de microstructures ordonnées tridimensionnelles acoustiques performantes par fabrication additive est possible. Les paramètres d'impression de la microstructure influencent directement les propriétés acoustiques. De plus, on a montré que la reproduction d'échantillons durant différentes impressions est possible, menant à un écart de moins de 2% sur le coefficient d'absorption mesuré.

De même, la création d'une structure homogène est confirmée au sein d'une seule impression dont on a tiré différents échantillons (différence d'impédance dans la zone de répétabilité des mesures au tube de Kundt). Une partie des déviations expérimentales enregistrées vis-à-vis des modèles AML et MML a pu être expliquée et prise en compte.

L'amélioration du procédé d'impression par la formulation d'un nouveau matériau d'impression (formulation dédiée), par l'augmentation de la vitesse d'impression et par la création de programmes de fabrication spécifiques (programmes d'impression haute vitesse et pour microstructure acoustique) a permis la production rapide et stable d'échantillons pour des tests acoustiques et mécaniques.

Une première campagne de tests mécaniques a été réalisée pour caractériser le comportement de la microstructure acoustique obtenue par fabrication additive avec un composite sandwich standard aéronautique. Des essais complémentaires sont encore à mener pour vérifier d'avantage d'exigences fonctionnelles

Ces résultats encouragent la poursuite des travaux de recherche pour développer une solution répondant à l'ensemble des exigences d'intégration de traitements acoustiques pour l'aviation.

La mise en place d'une collaboration tripartite entre les laboratoires LAVA, la chaire Composites SAFRAN, et le laboratoire LM2 permet le développement de solutions innovantes inédites et est essentiel à ce projet nécessitant différentes expertises.

BIBLIOGRAPHIE

- Akimov, A. V., Tanaka, Y., Pevtsov, A. B., Kaplan, S. F., Golubev, V. G., Tamura, S., ... Bayer, M. (2008). Hypersonic modulation of light in three-dimensional photonic and phononic band-gap materials. *Physical Review Letters*, 101(3), 33902.
- Allard, J., & Champoux, Y. (1992). New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(6), 3346–3353.
- Allard, J.-F., & Atalla, N. (1993). *Propagation of sound in porous media*.
- Almeida, C. R., Serra, T., Oliveira, M. I., Planell, J. A., Barbosa, M. A., & Navarro, M. (2014). Impact of 3-D printed PLA-and chitosan-based scaffolds on human monocyte/macrophage responses: unraveling the effect of 3-D structures on inflammation. *Acta Biomaterialia*, 10(2), 613–622.
- Atalla, N., Panneton, R., & Debergue, P. (1998). A mixed displacement-pressure formulation for poroelastic materials. *JOURNAL-ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, 104, 1444–1452.
- Atzeni, E., & Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 1147–1155.
- Banhart, J. (2006). Metal foams: production and stability. *Advanced Engineering Materials*, 8(9), 781–794. <http://doi.org/10.1002/adem.200600071>
- Bielak, G., Gallman, J., Kunze, R., & Murray, P. (2002). Advanced nacelle acoustic lining concepts development. 2002., 211672(211672). Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Advanced+Nacelle+Acoustic+Lining+Concepts+Development#0>
- Biot, M. A. (1941). General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12(2), 155–164.

- Biot, M. A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2), 168–178.
- Bock, J. (2011). A geometric study of liquid retention in open-cell metal foams. Retrieved from <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/24274>
- Bodla, K. K., & Garimella, S. V. (2014). Simulated Microstructural Evolution and Design of Porous Sintered Wicks. *Journal of Heat Transfer*, 136(7), 72601.
- Bodony, D. (2005). The prediction and understanding of jet noise. *Center for Turbulence Research Annual Research ...*, (Bodony), 367–377. Retrieved from http://www.stanford.edu/group/ctr/ResBriefs/temp05/bodony_jet.pdf
- Bolton, J. S. (2002). Modeling of Membrane Sound Absorbers, 4–9.
- Bourell, D. L., Beaman, J. J., Leu, M. C., & Rosen, D. W. (2009). A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. *Proceedings of RapidTech*, 24–25.
- Cai, X., Yang, J., & Hu, G. (2015). Optimization on microlattice materials for sound absorption by an integrated transfer matrix method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4), EL334–EL339. <http://doi.org/10.1121/1.4916791>
- Charles, C., Bonello, B., & Ganot, F. (2006). Propagation of guided elastic waves in 2D phononic crystals. *Ultrasonics*, 44, e1209–e1213.
- Chizari, K., & Therriault, D. (2015). Fabrication of Conductive Microfilaments and Liquid Sensor from CNTs/PLA Nanocomposites. In *Design, Manufacturing and Applications of Composites Tenth Workshop 2014: Proceedings of the Tenth Joint Canada-Japan Workshop on Composites, August 2014, Vancouver, Canada* (p. 214). DEStech Publications, Inc.
- Chu, B.-T., & Kovátsznay, L. S. G. (1958). Non-linear interactions in a viscous heat-conducting compressible gas. *Journal of Fluid Mechanics*, 3(05), 494–514.

- Coussy, O. (1991). *Mécanique des milieux poreux*. Editions Technip.
- Delany, M. E., & Bazley, E. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3(2), 105–116.
- Dupont, T., Leclaire, P., & Panneton, R. (2013). Acoustic methods for measuring the porosities of porous materials incorporating dead-end pores. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4), 2136–2145.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). *Additive manufacturing technologies*. Springer.
- Girvin, R. (2009). Aircraft noise-abatement and mitigation strategies. *Journal of Air Transport Management*, 15(1), 14–22.
- Goldstein, M. E. (1976). *Aeroacoustics*. New York, McGraw-Hill International Book Co., 1976. 305 P., 1.
- Guild, M. D., Garcia-Chocano, V. M., Kan, W., & Sánchez-Dehesa, J. (2014). Acoustic metamaterial absorbers based on confined sonic crystals. *arXiv Preprint arXiv:1405.7200*.
- Guo, S.-Z., Heuzey, M.-C., & Therriault, D. (2014). Properties of polylactide inks for solvent-cast printing of three-dimensional freeform microstructures. *Langmuir*, 30(4), 1142–1150.
- Hoang, M. (2012). Modélisation et simulation multi-échelle et multi-physique du comportement acoustique de milieux poroélastiques: Application aux mousses de faible densité. Retrieved from <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00799779/>
- Hyun, S., Choi, J.-E., & Kang, K.-J. (2009). Effect of imperfections on the mechanical behavior of wire-woven bulk kagome truss PCMs under shear loading. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23(5), 1270–1277.
- IROQUA projet. (2006). Panorama sur le bruit des avions et sur sa réduction. *Livre Blanc de l'Acoustique*.

- Ishizaki, K., Komarneni, S., & Nanko, M. (2013). *Porous materials: process technology and applications* (Vol. 4). Springer Science & Business Media.
- Jacobs, P. F. (1992). *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers.
- Johnson, D. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 176. Retrieved from http://journals.cambridge.org/abstract_S0022112087000727
- Jones, M., Howerton, B., & Ayle, E. (2012). Evaluation of Parallel-Element, Variable-Impedance, Broadband Acoustic Liner Concepts. & *Proceedings 저널. 프로시딩즈| 기술* ..., 1–17. Retrieved from <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2012-2194>
- Julliard, J. (2003). Problématique des matériaux absorbants sonores pour applications sur turboréacteur. *Journée Scientifique de l'ONERA*.
- Kosten, C. W., & Zwikker, C. (1949). *Sound absorbing materials*. Elsevier Amsterdam.
- Lafarge, D. (1993). Propagation du son dans les matériaux poreux à structure rigide saturés par un fluide viscothermique: Définition de paramètres géométriques, analogie électromagnétique, temps de relaxation.
- Lee, B.-K., & Kang, K.-J. (2010). A parametric study on compressive characteristics of wire-woven bulk Kagome truss cores. *Composite Structures*, 92(2), 445–453.
- Malmay, C. (2000). Etude théorique et expérimentale de l'impédance acoustique de matériaux en présence d'un écoulement d'air tangentiel. Le Mans.
- Martinezsala, R., Sancho, J., Sánchez, J. V, Gómez, V., Llinares, J., & Meseguer, F. (1995). Sound-attenuation by sculpture. *Nature*, 378(6554), 241.
- Miki, Y. (1990). Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 11(1), 19–24.

- Miyashita, T. (2005). Sonic crystals and sonic wave-guides. *Measurement Science and Technology*, 16(5), R47.
- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Medina, F., Lopez, H., Martinez, E., Machado, B. I., ... Wicker, R. B. (2010). Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1917), 1999–2032.
- Peters, M. C. (1993). *Aeroacoustic sources in internal flows*. Eindhoven University of Technology.
- Pride, S. R., & Berryman, J. G. (2003). Linear dynamics of double-porosity dual-permeability materials. I. Governing equations and acoustic attenuation. *Physical Review E*, 68(3), 36603.
- Reboul, G. (2010). *Modélisation du bruit à large bande de soufflantes de turboréacteurs*. Ecole Centrale de Lyon.
- Roger, M. (2012). Fundamentals of Aeroacoustics - I (vortex dynamics makes sound), 1–38.
- Romano, P. (2012). FLOCON Deliverable Adaptive and Passive Flow Control for Fan Broadband Noise Final Report on Casing and OGV Treatment Results, (September 2008), 1–73.
- Rott, N. (1969). Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes. *Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Physik ZAMP*, 20(2), 230–243.
- Salissou, Y. (2009). *Caractérisation des propriétés acoustiques des matériaux poreux à cellules ouvertes et à matrice rigide ou souple*. Université de Sherbrooke.
- Schaedler, T. A., Jacobsen, A. J., Torrents, A., Sorensen, A. E., Lian, J., Greer, J. R., ... Carter, W. B. (2011). Ultralight metallic microlattices. *Science*, 334(6058), 962–965.
- Setaki, F., & Tenpierik, M. (2014). Acoustic absorbers by additive manufacturing. *Building and ...*, 72, 188–200. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.010>

- Standard, A. (1998). E1050-98. *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System*.
- Stinson, M. R. (1991). The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(2), 550–558.
- Tanaka, Y., & Tamura, S. (1999). Acoustic stop bands of surface and bulk modes in two-dimensional phononic lattices consisting of aluminum and a polymer. *Physical Review B*, 60(19), 13294.
- Tarnow, V. (1996). Airflow resistivity of models of fibrous acoustic materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(6), 3706–3713.
- Therriault, D., Shepherd, R. F., White, S. R., & Lewis, J. A. (2005). Fugitive Inks for Direct-Write Assembly of Three-Dimensional Microvascular Networks. *Advanced Materials*, 17(4), 395–399.
- Tijdeman, H. (1975). On the propagation of sound waves in cylindrical tubes. *Journal of Sound and Vibration*, 39(1), 1–33. [http://doi.org/10.1016/S0022-460X\(75\)80206-9](http://doi.org/10.1016/S0022-460X(75)80206-9)
- Tournat, V., Pagneux, V., Lafarge, D., & Jaouen, L. (2004). Multiple scattering of acoustic waves and porous absorbing media. *Physical Review E*, 70(2), 26609.
- Ventres, C. S., Theobald, M. A., & Mark, W. D. (1982). Turbofan noise generation. volume 1: Analysis. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 83, 15041.
- Wadley, H. N. G. (2006). Multifunctional periodic cellular metals. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 364(1838), 31–68. <http://doi.org/10.1098/rsta.2005.1697>
- Wohlers, T. (2012). *Wohlers report 2012*. Wohlers Associates, Inc.

Wu, T.-T., Huang, Z.-G., & Lin, S. (2004). Surface and bulk acoustic waves in two-dimensional phononic crystal consisting of materials with general anisotropy. *Physical Review B*, 69(9), 94301.

ANNEXE A - RÉSONATEUR DE HELMHOLTZ

Un résonateur de Helmholtz est une cavité résonante de volume V connectée par un col de section S_{col} et de longueur l . Il est assimilable à un oscillateur. En effet si on se ramène à un système mécanique par analogie, on obtient un système masse-ressort dont la fréquence de résonance dépend uniquement de la géométrie de la cavité.

La modélisation la plus simple est de supposer l'air contenu dans le col incompressible et assimilé à une masse m , tandis que l'air contenu dans la cavité est considéré compressible soumis au déplacement de la masse mobile m et est alors assimilée à un ressort de raideur k .

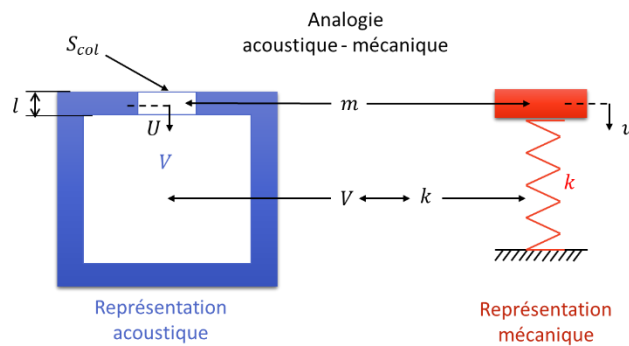


Figure A-1 : Résonateur de Helmholtz et son analogie mécanique

On obtient alors :

La fréquence de résonance typique d'un oscillateur mécanique :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7-1)$$

avec pour masse vibrante : $m = \rho \cdot S_{col} \cdot l$

et la raideur pneumatique de la cavité de volume V dans le cas d'un régime adiabatique :

$$k = \frac{\rho \cdot c^2 \cdot S_{col}^2}{V}$$

Il en résulte :

$$f_{res.Helmholtz} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{col}}{V_{cavité} \cdot l}} \quad (7-2)$$

Pour améliorer la prédiction de la fréquence de résonance avec des résultats expérimentaux on peut dans un premier temps prendre en compte l'écoulement à l'entrée et à la sortie du col qui augmente la masse d'air effectivement déplacée par la mise en résonance du résonateur, on considère ainsi :

$$f_{res.Helmholtz.corr} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{col}}{V_{cavité} \cdot (l + \delta)}} \quad (7-3)$$

Avec la correction de col usuelle pour les cols cylindriques :

$$\delta = 0,96 \cdot \sqrt{S_{col}}$$

ANNEXE B - RÉSONATEUR QUART D'ONDE

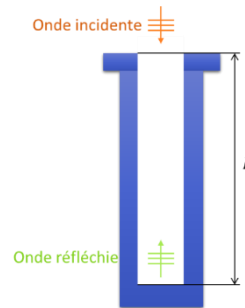


Figure B-2 : Résonateur quart d'onde

Un résonateur quart d'onde est une cavité dont une seule dimension est de l'ordre de grandeur de la longueur à atténuer λ , les 2 autres dimensions de l'espace étant très petites devant elle ($Ka \ll 1$). On observe alors une propagation de l'onde dans la direction longitudinale du tube. À l'extrémité du tube (fermée ou ouverte) une onde réfléchie est générée par discontinuité de l'impédance, on peut alors générer des interférences destructives entre l'onde incidente et réfléchie au sein du tube.

Les fréquences de résonances sont obtenues (interférences constructives) pour :

$$f_r = \frac{(2n + 1) \cdot c}{4 L} \quad (7-4)$$

Les fréquences d'antirésonances sont obtenues (interférences destructives) pour :

$$f_a = \frac{2n \cdot c}{4 L} = \frac{n \cdot c}{2L} \quad (7-5)$$

Le premier mode quart d'onde observé est de fréquence : $f_\lambda = \frac{c}{4 L}$